



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Desenvolvimento de um sistema para medição indireta do nível de tanques industriais

Victor Hugo Godoy

João Monlevade, MG
2026

Victor Hugo Godoy

**Desenvolvimento de um sistema para
medição indireta do nível de tanques
industriais**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Marcelo Moreira Tiago

Coorientador: Prof. Márcio Feliciano Braga

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2026**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G589d Godoy, Victor Hugo.

Desenvolvimento de um sistema para medição indireta do nível de tanques industriais. [manuscrito] / Victor Hugo Godoy. - 2026.
69 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Feliciano Braga.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Calibração - Instrumentos de medição. 2. Indústrias - Tanques. 3. Instrumentos de medição. 4. Medição. 5. Medidores de fluxo. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Braga, Marcio Feliciano. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.2

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6/2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Victor Hugo Godoy

Desenvolvimento de um sistema para medição indireta do nível de tanques industriais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 13 de fevereiro de 2026.

Membros da banca

Dr. Marcelo Moreira Tiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Márcio Feliciano Braga - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Igor Dias Neto de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Wendy Yadira Eras Herrera - Universidade Federal de Ouro Preto

Marcelo Moreira Tiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/03/2026, às 10:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1068195** e o código CRC **1963117F**.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida, pela força e pela determinação necessárias para superar todos os obstáculos, transformando cada pedra do caminho em parte da pavimentação dessa trajetória. Aos meus pais, expresso minha gratidão eterna pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha jornada; até mesmo os puxões de orelha foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. À minha namorada e futura esposa, Daniele, que permaneceu ao meu lado nos momentos em que tudo parecia incerto, tornando-se uma luz constante em meio à escuridão. Aos meus amigos, pelo companheirismo e por tornarem essa caminhada mais leve, agradável e dinâmica. Aos professores, que além do conhecimento técnico, compartilharam valores e perspectivas essenciais para a vida. E, de forma especial, aos professores e orientadores Marcelo e Marcio, pela orientação dedicada, pelo acompanhamento atento ao longo dessa etapa tão desafiadora e por tornar essa fase final mais significativa e repleta de aprendizados.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de técnicas para a implementação de um sistema de medição indireta de nível em tanques industriais, utilizando como referência informações obtidas por meio de um medidor de vazão de saída que foi adicionado a planta com o intuito de realizar a medição indireta de nível. A planta piloto Smar PD3-F foi empregada como plataforma de desenvolvimento, utilizando-se o sensor do tipo turbina YF-S201 para estimar a vazão de saída de um dos tanques. Descrevem-se as etapas de calibração estática, nas quais se estabeleceu a relação entre os valores de vazão de um sensor de referência e a frequência gerada pelo medidor turbina. Tais dados fundamentaram a implementação de um método de medição indireta baseado no princípio do balanço de massas. Adicionalmente, apresenta-se uma análise fundamentada na relação direta entre nível e vazão de saída em um tanque pressurizado. Os resultados indicam que a baixa resolução do medidor instalado (450 pulsos por litro) impacta diretamente a estimativa do nível. Nos ensaios realizados, o método de balanço de massas apresentou erro acumulado superior a 5 %, decorrente de efeitos transitórios no circuito hidráulico após o acionamento da motobomba. Em contrapartida, o método baseado na relação direta entre nível e vazão demonstrou maior precisão, com erros inferiores a 3 %.

Palavras-chave: Sistemas de medição, Vazão, Nível, Instrumentação eletrônica.

Abstract

This work presents a study of techniques for implementing an indirect level measurement system in industrial tanks, using information obtained from an outlet flow meter added to the plant to enable indirect level measurement. The Smar PD3-F pilot plant was used as the development platform, and a YF-S201 turbine-type meter was employed to estimate the outlet flow rate of one of the tanks. The stages of the static calibration procedure are described, relating flow values from a reference sensor to the frequency values generated by the turbine meter. This information was used to implement an indirect level measurement method based on the mass balance principle. Subsequently, an analysis based on the direct relationship between level and outlet flow values for a pressurized tank is presented. The results show that the low resolution of the installed flow meter (450 pulses per liter) directly affects the estimated level values. In the tests performed, the mass balance method presented a high cumulative error, exceeding 5 %, caused by transient effects in the hydraulic circuit following the activation of the pump. Comparatively, the method based on the direct relationship between level and outlet flow presented errors lower than 3 %.

Keywords: Measurement systems, Flow rate, Level, Electronic instrumentation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Foto da planta piloto SMAR PD3-F.	23
Figura 2 – Diagrama P&ID da planta didática SMAR PD3-F.	23
Figura 3 – Topologia da rede digital da planta piloto.	25
Figura 4 – Representação em corte de um sensor capacitivo.	28
Figura 5 – Modo de instalação de medidores de pressão diferencial aplicados à medição de vazão.	30
Figura 6 – Perfil de pressão do fluxo após a placa de orifício.	31
Figura 7 – Sistema de medição de nível por pressão diferencial instalado em tanque fechado.	33
Figura 8 – Desenho mecânico do sensor YF-S201.	35
Figura 9 – Foto do sensor de vazão YF-S201 instalado na tubulação de saída do tanque de aquecimento da planta SMAR PD3-F.	46
Figura 10 – Diagrama de conexão do sistema.	47
Figura 11 – Fluxograma de comunicação do arduino.	48
Figura 12 – Fluxograma de funcionamento da planta e do <i>Matrix Laboratory</i> (MATLAB).	48
Figura 13 – Sinais adquiridos ao longo do processo de calibração estática do novo medidor de vazão de saída.	50
Figura 14 – Análise da dispersão dos valores de vazão de entrada (medidos por Transmissor Indicador de vazão (FIT, do inglês <i>Flow Indicator Trans-</i> <i>mitter</i>) (FIT)-31).	51
Figura 15 – Análise da dispersão dos valores de frequência de saída (medidos por Transmissor de vazão (FT, do inglês <i>Flow Transmitter</i>) (FT)-31A).	52
Figura 16 – Relação entre vazão de entrada e frequência de saída obtidos a partir do ensaio de calibração estático. Foram utilizados pontos de operação entre 35 % e 55 %.	53
Figura 17 – Comparação entre valores de vazão de entrada medidos a partir de Transmissor Indicador de vazão (FIT, do inglês <i>Flow Indicator Trans-</i> <i>mitter</i>) (FIT)-31 (a) e valores de vazão de saída estimada a partir dos valores de frequência medidos a partir de Transmissor de vazão (FT, do inglês <i>Flow Transmitter</i>) (FT)-31A (b).	54
Figura 18 – Resultado da análise considerando parâmetros do ensaio 1. Em (a), sinal de referência utilizado. Em (b), vazão medida por Transmissor Indicador de vazão (FIT, do inglês <i>Flow Indicator Transmitter</i>) (FIT)- 31. Valores de frequência medidos por Transmissor de vazão (FT, do inglês <i>Flow Transmitter</i>) (FT)-31A são apresentados em (c) e (d).	55

Figura 19 – Comparação entre valores de vazão (obtidos a partir de Transmissor Indicador de vazão (FIT, do inglês <i>Flow Indicator Transmitter</i>) (FIT)-31) e frequência (medidos usando Transmissor de vazão (FT, do inglês <i>Flow Transmitter</i>) (FT)-31A) para os ensaios 1 (a), 2 (b) e 3 (c). . . .	56
Figura 20 – Gráficos de nível em função do tempo, obtidos a partir de Transmissor Indicador de nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>) (LIT)-31. Figura (a) apresenta período transitório e Figura (b), regime permanente.	58
Figura 21 – Comparação entre valores de nível medidos por Transmissor Indicador de nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>) (LIT)-31 (a) e estimados a partir do método de balanço de massas (b).	59
Figura 22 – Relação entre nível medido por Transmissor Indicador de nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>) (LIT)-31 (eixo x) e nível estimado por meio do método do balanço de massas (eixo y).	60
Figura 23 – Resultados obtidos a partir do ensaio 1	61
Figura 24 – Resultados obtidos a partir do ensaio 2	62
Figura 25 – Comparação entre valores de frequência, medidos por Transmissor de vazão (FT, do inglês <i>Flow Transmitter</i>) (FT)-31A, e nível, medidos por Transmissor Indicador de nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>) (LIT)-31. A Figura (a) apresenta resultado do ensaio 1, e a Figura (b) apresenta resultado do ensaio 2.	63
Figura 26 – Curvas de calibração obtidas a partir dos ensaios 1 (a) e 2 (b). Em preto, barras de erro usadas para definir uma tolerância de $\pm 5\%$. . .	63
Figura 27 – Comparação entre valores de nível medidos por Transmissor Indicador de nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>) (LIT)-31 (em azul) e estimados a partir de valores de frequência medidos por Transmissor de vazão (FT, do inglês <i>Flow Transmitter</i>) (FT)-31A para os ensaios 1 (a) (em amarelo) e 2 (b) (em vermelho).	64
Figura 28 – Resultado da análise comparativa entre valores de nível medidos por Transmissor Indicador de nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>) (LIT)-31 (em azul) e valores estimados (em amarelo). Figuras (a), (b) e (c) apresentam resultados dos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.	65
Figura 29 – Análise dos erros instantâneos em função do tempo. Figuras (a), (b) e (c) apresentam resultados dos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.	66
Figura 30 – Representação dos erros instantâneos em forma de histogramas. Figuras (a), (b) e (c) apresentam resultados dos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.	67

Lista de tabelas

Tabela 1	– Dados de placa da bomba trifásica KSB, modelo P500T.	27
Tabela 2	– Comparação entre valores médios e desvios padrão, obtidos durante o processo de calibração do medidor de vazão YF-S201.	53
Tabela 3	– Conjunto de dados de calibração fornecido pelo fabricante do medidor de vazão YF-S201.	53
Tabela 4	– Parâmetros para geração dos sinais senoidais usados como referência nos ensaios de validação dinâmicos.	54
Tabela 5	– Parâmetros ajustados para as curvas de calibração, considerando os ensaios 1 e 2. São apresentados valores de R^2 e norma do resíduo para cada caso.	63
Tabela 6	– Parâmetros obtidos ao longo da análise do comportamento do erro instantâneo calculado considerando os ensaios com sinais senoidais. . .	65

Lista de siglas e abreviaturas

FIT	Transmissor Indicador de vazão (FIT, do inglês <i>Flow Indicator Transmitter</i>)
FT	Transmissor de vazão (FT, do inglês <i>Flow Transmitter</i>)
FY	Atuador de vazão (LT, do inglês <i>Flow control actuator</i>)
LIT	Transmissor Indicador de nível (LIT, do inglês <i>Level Indicator Transmitter</i>)
LT	Transmissor de nível (LT, do inglês <i>Level Transmitter</i>)
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
TIT	Transmissor Indicador de temperatura (TIT, do inglês <i>Temperature Indicator Transmitter</i>)

Lista de símbolos

A_H	Área do ponto de alta pressão
t	Tempo
α	Ângulo das pás da hélice
ΔC	Variação da capacitância
Δd	Diferença de distância inicial entre placas
ΔP	Diferença de pressão
Δt	Variação de tempo
ΔV	Variação do volume
ϵ	Permissividade do dielétrico
$\frac{dV}{dt}$	Variação do volume em função do tempo
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ω	Velocidade angular do rotor
ω_r	Velocidade angular real do rotor
ρ	Densidade do fluido
A	Área da seção transversal
A_d	Área da seção transversal do diâmetro menor
A_D	Área da seção transversal do diâmetro maior
A_T	Área do tanque
C	Capacitância
C_d	Coefficiente de descarga
C_{HP}	Capacitância em alta pressão
C_{LP}	Capacitância em baixa pressão
d	Distância entre as placas do sensor
D	Diâmetro
d_0	Distância inicial entre placas
f	Frequência do sinal do sensor
f_a	Fator de atrito
g	Aceleração da gravidade
h	Altura do líquido no tanque
h_H	Altura do líquido no ponto de alta pressão
h_L	Altura do líquido no ponto de baixa pressão
L	Comprimento
N	Número de pás do rotor
P	Pressão estática
P_H	Pressão no ponto de alta pressão

P_L	Pressão no ponto de baixa pressão
Q	Vazão volumétrica
Q_r	Vazão volumétrica real
Q_{in}	Vazão de entrada do tanque
Q_{out}	Vazão de saída do tanque
R	Raio efetivo do rotor
Re	Número de Reynolds
v	Velocidade do fluido
v_H	velocidade do fluido em alta pressão
v_L	velocidade do fluido em baixa pressão
v_p	velocidade linear tangencial

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação e Justificativas	17
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivos específicos	18
1.3	Estado da arte	18
1.4	Estrutura do trabalho	21
2	REVISÃO TEÓRICA	22
2.1	Planta piloto SMAR PD3-F	22
2.2	Rede de comunicação industrial	25
2.3	Atuadores hidráulicos	26
2.4	Módulo transmissor de pressão	28
2.4.1	Medição de vazão	30
2.4.2	Medição de nível	32
2.5	Sensor de vazão tipo turbina	35
2.6	Métodos de medição	37
2.6.1	Determinação do nível de um tanque a partir do volume acumulado . .	38
2.6.2	Determinação do nível de um tanque a partir da medição da vazão de saída	39
2.7	Técnicas para calibração de sistemas de medição	40
2.7.1	Calibração estática	41
2.7.2	Calibração Dinâmica	43
2.8	Considerações parciais	43
3	CARACTERIZAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO DO TIPO TURBINA	44
3.1	Configuração da planta piloto	44
3.1.1	Configuração do acesso remoto à planta usando <i>Matrix Laboratory</i> (MATLAB) e servidor OPC	44
3.1.2	Parametrização do inversor de frequência	45
3.1.3	Instalação do sensor	45
3.2	Calibração estática do medidor de vazão	49
3.3	Caracterização dinâmica do sistema de medição	54
3.4	Considerações parciais	57

4	MEDIÇÃO INDIRETA DO NÍVEL DE TANQUES A PARTIR DA VAZÃO	58
4.1	Método do balanço de massas	58
4.2	Calibração dinâmica do sistema	60
4.3	Considerações parciais	66
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1	Etapas futuras	69
	REFERÊNCIAS	70

1 Introdução

A evolução da indústria ao longo dos últimos anos trouxe consigo a necessidade de desenvolver técnicas mais eficientes para a medição e o controle de processos em diversas áreas de atuação. Esses avanços estão diretamente relacionados à evolução dos microprocessadores e dos sistemas eletrônicos embarcados, que se popularizaram após o surgimento dos primeiros computadores pessoais.

Por meio de sistemas digitais, tarefas que até então eram implementadas de forma analógica passaram a ser executadas digitalmente. A partir da utilização desse tipo de plataforma, sistemas até então controlados de forma analógica passaram a ser controlados digitalmente, permitindo a substituição de parte dos circuitos eletrônicos por algoritmos definidos em função do processo que se deseja monitorar ou controlar.

Esses avanços contribuíram para o desenvolvimento de uma nova categoria de sensores e atuadores, denominados pela indústria como dispositivos inteligentes. Em geral, esses dispositivos podem ser utilizados por meio de redes de comunicação nas quais fluem as informações obtidas pelos sensores.

Esses dispositivos, quando aplicados em ambientes industriais reais, demandam mecanismos confiáveis para a troca de informações entre sensores, atuadores e controladores. Nesse contexto, em aplicações de automação industrial em ambientes de planta e fábrica, podem ser utilizadas redes de comunicação industrial, tais como Fieldbus, Modbus ou Ethernet para viabilizar o controle e o monitoramento dos processos.

Para garantir a robustez do processo, é necessário que os sensores e atuadores sejam previamente calibrados e parametrizados. Esse processo exige uma estrutura adequada e equipamentos de referência, sendo muitas vezes realizado em laboratórios especializados. Em aplicações industriais, há uma série de parâmetros que devem ser constantemente monitorados. Como exemplo, podem-se citar a vazão e a pressão de tubulações, além da temperatura e o nível de tanques, frequentemente utilizados em indústrias químicas, farmacêuticas e de óleo e gás (LIPTAK, 2003).

O trabalho será desenvolvido usando como plataforma uma planta piloto composta por dois tanques equipados com sensores inteligentes utilizados para medir as vazões de entrada, conforme pode ser visto na Figura 2, na qual é indicado o percurso realizado pelo fluido na planta. Além disso, um dos tanques possui um sensor capacitivo para medição indireta de nível, cujo princípio de funcionamento compara a pressão em duas regiões diferentes do tanque, resultando em uma variação na sua capacitância. Esse sensor será utilizado como referência ao longo deste estudo.

Neste trabalho, um medidor de vazão do tipo turbina foi instalado na saída de um dos tanques, conforme pode ser observado em destaque na cor azul na Figura 2. Esse tipo de medidor apresenta baixo custo e fácil instalação, o que mostra uma grande vantagem

na escolha, mas possui limitações, como a baixa resolução e a carga hidráulica adicionada ao sistema, que serão descritas ao longo do trabalho.

Foram propostas etapas de calibração e validação, nas quais os resultados estimados foram comparados a valores de referência fornecidos por instrumentos de medição presentes na planta piloto.

O sistema proposto foi projetado para operar com erros em regime permanente abaixo de 5 %, calculados a partir dos valores medidos por sensores de referência.

1.1 Motivação e Justificativas

A motivação deste trabalho está associada à necessidade de empregar métodos indiretos para a medição do nível em tanques industriais, visto que sensores de medição direta exigem intervenções físicas mais invasivas no tanque, enquanto a medição indireta apresenta maior facilidade de instalação e monitoramento. Os objetivos envolvem a caracterização de sensores inteligentes utilizados para medição direta, nos quais as grandezas de interesse, que são a vazão e o nível em tanques industriais, são medidas diretamente, e o desenvolvimento de um sistema para medição indireta de nível, em que são utilizadas diferentes variáveis, como pressão e velocidade, destinadas ao mesmo tipo de aplicação que possa ser replicada em outros locais.

A planta piloto que será utilizada ao longo do trabalho possui limitações em relação aos sensores presentes, como, por exemplo, a ausência de um sensor de nível no tanque de mistura. Dessa maneira, o sistema que será implementado por meio do tanque de aquecimento acrescentará à instrumentação da planta Smar PD3-F, tornando possível a medição do nível no tanque de mistura.

Logo, a disponibilidade de medição da variável de nível no tanque de mistura possibilitaria a implementação de estratégias de controle, como, por exemplo, o controle em cascata de nível e vazão, e também a compensação da temperatura através da mistura do fluido. Sob essa perspectiva, a medição do nível no tanque de mistura teria uma função adicional de supervisão e segurança, permitindo o amortecimento de perturbações hidráulicas e ajudando a prevenir condições indesejadas, como esvaziamento ou transbordamento do tanque.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal implementar um sistema para a medição indireta de nível em tanques industriais, utilizando, para isso, informações obtidas por meio de sensores de vazão posicionados na entrada e saída do tanque analisado.

1.2.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser cumpridos:

- Instalar medidores de vazão do tipo turbina de saída dos tanques e desenvolver um sistema eletrônico embarcado para enviar as informações adquiridas para um computador por meio de comunicação serial RS-232;
- Obter as curvas de calibração específicas para cada um dos sensores adicionados, usando como referência os sensores de vazão de entrada que compõem a planta;
- Levantar curvas de calibração para relacionar o volume acumulado nos tanques, obtido por meio da relação entre as vazões de entrada e saída, e o nível, obtido por meio de um sensor instalado em um dos tanques;
- Realizar a comparação entre os resultados obtidos de forma direta e indireta.

1.3 Estado da arte

A medição, controle e monitoramento de sistemas de fluidos dependem de diversos fatores, como o tipo do medidor, a precisão, o local de instalação e a topologia da tubulação (BARGIELA; HAINSWORTH, 1989). Em aplicações envolvendo a indústria petrolífera e química, onde o valor monetário e o impacto ao meio ambiente são extremamente relevantes, a manutenção técnica e metrológica torna-se essencial para minimizar perdas ao longo da cadeia industrial, principalmente tratando-se de volumes expressivos nos quais um mínimo erro impactaria de forma expressiva o processo (MEŠKUOTIENĖ et al., 2022).

A manutenção elétrica e metrológica tem como função principal garantir a confiabilidade das medições. Para isso, é necessário realizar periodicamente a calibração dos equipamentos. Esse procedimento pode ser feito relacionando-se valores medidos à valores de referência (obtidos usando equipamentos especiais) por meio de uma curva de calibração (AGUIRRE, 2013).

Nesse sentido, a calibração estática, também conhecida como calibração em regime permanente, utiliza pontos de operação específicos para relacionar os parâmetros medidos aos de referência. Trata-se de um processo simplificado que não leva em consideração o comportamento dinâmico do equipamento que se deseja calibrar (KHAJAVIAN et al., 2023).

Nos processos de calibração dinâmica, busca-se caracterizar o desempenho dos sistemas de medição em função do tempo. Dessa forma, pode-se avaliar como o sistema se comporta nos instantes em que suas entradas são submetidas à variações dinâmicas.

Na prática, todos os sistemas de medição possuem características dinâmicas. Entretanto, quando o tempo de resposta é significativamente pequeno em comparação à grandeza que se deseja caracterizar, pode-se simplificar o processo de calibração, considerando-se apenas o comportamento estático do dispositivo (AGUIRRE, 2013).

Sorli, Figliolini e Pastorelli (2004) destacam a importância da utilização de um procedimento adequado de calibração estática e dinâmica de forma conjunta. No trabalho apresentado pelos autores, sinais senoidais foram utilizados como referência para caracterizar o atraso na atuação de válvulas pneumáticas.

No estudo desenvolvido por Radj e Kamalanathan (2023), um medidor de vazão do tipo turbina devidamente calibrado foi utilizado para identificar diferentes tipos de fluidos. A partir de parâmetros como viscosidade cinemática e densidade do fluido, foi possível detectar adulterações de óleo diesel usando como referência medições de vazão na saída de um tanque. Os autores mostram que os valores medidos apresentam grande variação quando o combustível puro é substituído por uma versão adulterada.

No trabalho apresentado por Zeghloul, Azzi e Ghendour (2021), os autores utilizaram um medidor para determinar a vazão mássica do ar. Para isso, compressores de ar foram empregados para equilibrar a pressão entre dois pontos, e um osciloscópio digital foi usado para monitorar a frequência de saída do medidor. A partir dos resultados obtidos, os autores definiram uma curva de calibração, que relaciona frequência e vazão mássica de ar.

No trabalho apresentado por Goyal (2021), foram realizados testes em protótipos de turbinas para usinas hidrelétricas. Na análise realizada, foram consideradas tanto as incertezas sistemáticas quanto as aleatórias na medição de diferentes variáveis no processo, submetidas a métodos primários e secundários de calibração. Um aspecto importante do trabalho foi a avaliação das incertezas aleatórias, que independem da repetição das medições e que são difíceis de quantificar por meio de análises estatísticas.

Husni, Basri e Yani (2019) analisaram diversos parâmetros que interferem no funcionamento correto dos medidores de vazão do tipo turbina. Para determinados tipos de fluidos, a variação de parâmetros como velocidade, fluxo, viscosidade, volume e também dos elementos presentes influencia diretamente a escolha do tipo de turbina para cada caso. Ao analisar diversas condições adversas ao longo do processo de medição, foram destacadas as causas e possíveis soluções para os problemas apresentados.

Dentre os principais pontos observados, os autores destacam um problema encontrado com frequência em aplicações industriais: indicações de vazão superiores aos valores medidos por equipamentos de referência. Os autores destacam que uma das possíveis causas para esse problema é a presença de gás na tubulação durante o processo de medição, um problema que também foi observado na planta piloto e que causou transitórios iniciais nas medições de vazão e nível do sistema. Os autores ressaltam os vários desafios envolvidos quando se utiliza medidores desse tipo, uma vez que diversas variáveis interferem

diretamente no resultado final.

Lalnunthari e Thanga (2017) utilizaram tubos de entrada e saída para analisar o desempenho de medidores de vazão do tipo turbina. Foram avaliados projetos em que a tubulação de entrada e saída apresentava um diâmetro menor do que a tubulação interna do sensor empregado, analisando os efeitos dessas alterações na curva de calibração fornecida pelo fabricante do instrumento.

Os autores demonstram que a variação do diâmetro da tubulação de entrada gera maior interferência na curva de calibração. Eles destacam o caso em que ocorre uma redução do diâmetro da tubulação de entrada do sensor. Nessa condição, a velocidade de escoamento do fluido aumenta, elevando a velocidade de rotação das pás e do eixo do sensor. Essa variação provoca uma variação significativa na curva de calibração do dispositivo, que passa a apresentar um valor de inclinação superior.

O trabalho de Paton (2005) destaca um conjunto de técnicas e boas práticas associadas a calibração de medidores de vazão, bem como os padrões de referência usados para garantir a rastreabilidade metrológica. São analisados os principais métodos de calibração, como o de pesagem, o volume deslocado, a pressão diferencial e o de sistemas de referência. São descritas também as principais fontes de incerteza, com destaque para a temperatura, viscosidade e as incertezas intrínsecas ao medidor. Um ponto importante abordado é a diferenciação entre os padrões primários, que realizam medições diretas e têm incertezas mínimas, e os padrões secundários, que são utilizados para calibração industrial rotineira.

Há um conjunto de normas e recomendações, definidas pelas organizações ISO (do inglês, *International Organization for Standardization*) e pela OIML (do inglês, *International Organization of Legal Metrology*), que estabelecem as diretrizes e os requisitos técnicos fundamentais para a medição de vazão de líquidos em tubulações fechadas, fundamentando-se em métodos de pesagem, volume deslocado ou comparação direta (ISO/IEC, 2017; OIML, 2013; OIML, 1984).

Tais documentos definem parâmetros para assegurar a confiabilidade e a rastreabilidade metrológica, especificando diretrizes de instalação, condições operacionais e o controle de variáveis de influência. Ademais, as normas orientam a avaliação da repetibilidade, da estabilidade do escoamento e das propriedades do fluido, visando a padronização do desempenho de sistemas de calibração e a reprodutibilidade dos resultados entre diferentes laboratórios.

No que tange à medição de nível, as recomendações OIML (2008a), OIML (2008b) estabelecem as diretrizes metrológicas fundamentais para tanques de armazenamento e seus respectivos sistemas de medição. A recomendação OIML (2008a) define os requisitos para tanques fixos, abrangendo desde as especificações de projeto e construção até os protocolos de verificação metrológica e integridade estrutural. Complementarmente, a recomendação OIML (2008b) prescreve os requisitos técnicos para medidores automáticos,

estipulando os erros máximos permitidos (EMP), as condições operacionais e os critérios de desempenho. Em conjunto, tais documentos fornecem um conjunto de parâmetros técnicos necessários para assegurar a rastreabilidade e a confiabilidade das medições de volume, promovendo a harmonização com os padrões metrológicos internacionais.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1, é apresentada a introdução ao tema a ser utilizado, citando a importância dos assuntos abordados no meio industrial e os problemas e os objetivos a serem resolvidos.

No Capítulo 2, descrevem-se os principais conceitos teóricos utilizados ao longo do desenvolvimento do trabalho. São apresentados aspectos gerais associados a medidores de vazão e nível, bem como aspectos específicos relacionados à planta piloto empregada ao longo dos ensaios realizados.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia e os principais resultados obtidos ao utilizar um medidor de vazão do tipo turbina para determinar a vazão de saída de um tanque industrial.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos ao utilizar o medidor de vazão do tipo turbina de forma indireta para estimar o nível de um tanque pressurizado.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais obtidas neste trabalho, bem como um conjunto de sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 Revisão teórica

Este capítulo apresenta uma revisão teórica contendo os principais conceitos necessários para a compreensão das atividades desenvolvidas neste trabalho. Inicialmente, a planta piloto SMAR PD3-F, utilizada ao longo de todo o trabalho, é apresentada. São descritas as principais características das malhas de controle que compõem a planta piloto, o conjunto de sensores e atuadores presentes em cada malha, o sistema de comunicação utilizado para acessar a planta remotamente e o procedimento utilizado para controlar os instrumentos e adquirir as informações referentes aos ensaios, utilizando o *software* MATLAB.

Em seguida, apresenta-se uma revisão de conceitos básicos relacionados à mecânica dos fluidos, necessários para compreender o princípio de funcionamento dos medidores de pressão diferencial utilizados na planta piloto. Nessa etapa, também são apresentados alguns fatores de perda que devem ser considerados durante a etapa de caracterização e calibração do sistema de medição.

Como mencionado no Capítulo anterior, neste trabalho, um medidor de vazão do tipo turbina será utilizado para determinar a vazão de saída de um tanque industrial. Para compreender o princípio de funcionamento e as principais características desses medidores, são descritos alguns conceitos de mecânica dos fluidos envolvendo o comportamento dinâmico de medidores com essas características.

Finalmente, são descritas as principais normas referentes à calibração de sistemas de medição de vazão e nível, bem como os procedimentos recomendados por agências reguladoras para a calibração e caracterização de instrumentos de medição de vazão e nível.

2.1 Planta piloto SMAR PD3-F

Este trabalho foi desenvolvido utilizando como plataforma base a planta piloto SMAR PD3-F, cujo objetivo é reproduzir, em escala reduzida, o comportamento de sistemas de controle de vazão, nível e temperatura, utilizando sensores, atuadores e sistemas de comunicação empregados em aplicações industriais reais (SMAR, 2012). A Figura 1 apresenta uma foto da planta piloto utilizada.

A parte inferior da planta possui um reservatório aberto, que funciona como tanque de abastecimento. Para a realização dos ensaios apresentados neste trabalho, esse tanque foi preenchido com água. Duas bombas hidráulicas, posicionadas na parte inferior da planta, são utilizadas para bombear água do tanque de abastecimento para os tanques fechados localizados na parte superior da planta.

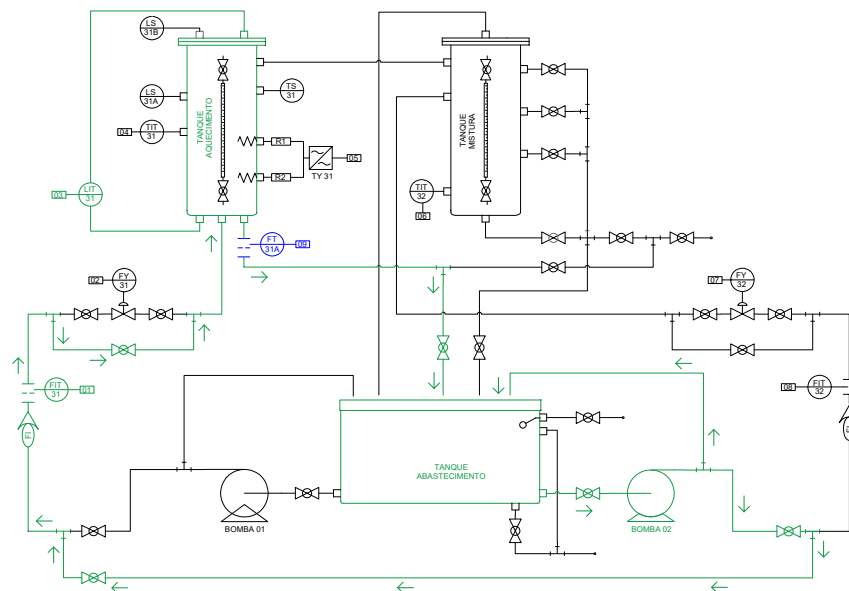
Figura 1 – Foto da planta piloto SMAR PD3-F.



Fonte: retirado de SMAR (2012).

Para facilitar a organização dos sistemas elétrico, hidráulico e pneumático, a planta foi dividida em duas malhas de controle. A Figura 2 apresenta o diagrama P&ID (do inglês, *Piping and Instrumentation Diagram*) que representa as malhas de controle, tanques, sensores, atuadores e tubulação que compõem a planta piloto.

Figura 2 – Diagrama P&ID da planta didática SMAR PD3-F.



Fonte: adaptado de SMAR (2012).

No diagrama apresentado, em verde, destaca-se o circuito hidráulico utilizado, e em azul, o medidor de vazão adicionado à planta para a realização deste trabalho. Um conjunto de letras (*tags*) foi utilizado para representar a identificação funcional dos instrumentos de medição e dos atuadores presentes na planta, e uma sequência numérica

foi utilizada para dividir a planta em duas malhas de controle: 31 e 32. Essa identificação segue o padrão definido pela norma ISA 5.1. Uma rede de comunicação industrial (*Foundation Fieldbus HSE*) é utilizada para interligar sensores e atuadores instalados na planta.

As bombas que compõem o sistema possuem características distintas. A bomba 01, localizada à esquerda da planta, utiliza um motor monofásico com controle *on/off*. A bomba 02, posicionada na parte inferior direita da planta, utiliza um motor trifásico, acionado por um inversor de frequência (WEG, modelo CFW-08).

Pode-se controlar a vazão de saída da bomba por meio da variação da frequência do sinal de saída do inversor. Para isso, deve-se aplicar um sinal de referência de corrente (4 mA a 20 mA) na entrada de controle do inversor. Um módulo conversor (Smar, modelo FI302), representado pela *tag* UIC-31, é utilizado para converter o sinal digital enviado a partir da rede de comunicação em um sinal de referência de corrente analógico, aplicado à entrada de controle do inversor de frequência.

A planta possui um conjunto de válvulas manuais que possibilitam o redirecionamento do fluxo de saída das bombas. Dessa forma, pode-se selecionar o tipo de bomba mais adequado em função do tipo de aplicação implementada em cada malha.

Na parte superior da planta, foram instaladas duas válvulas do tipo globo controladas por atuadores eletropneumáticos (Smar, modelo FY302), representadas pelas *tags* Atuador de vazão (LT, do inglês *Flow control actuator*) (FY)-31 e FY-32. Por meio do ajuste dos posicionadores, pode-se controlar o valor percentual de abertura das válvulas e, consequentemente, a vazão de entrada dos tanques superiores. É importante mencionar que as válvulas controláveis podem ser isoladas do circuito hidráulico por meio de válvulas manuais. Esse ajuste permite que a vazão de entrada de um dos tanques seja controlada exclusivamente pela bomba 02, sem interferência das válvulas do tipo globo.

Dois tanques fechados, denominados tanque de aquecimento e tanque de mistura, foram posicionados na parte superior da planta. O tanque de aquecimento possui um atuador térmico, composto por uma resistência elétrica e uma interface de potência, que permite que a temperatura do líquido no interior do tanque seja elevada. O tanque de mistura pode ser utilizado para misturar água quente, proveniente do tanque de aquecimento, com água fria, oriunda do tanque de abastecimento.

Sensores de temperatura (Smar, modelo TT-302), representados pelas *tags* TIT-31 e TIT-32, e medidores de vazão (Smar, modelo LD302D), representados pelas *tags* FIT-31 e FIT-32, foram instalados nos dois tanques. Um medidor de nível (Smar, modelo LD302D), representado pelas *tags* LIT-31, foi instalado no tanque de aquecimento.

A ausência de um medidor de nível instalado no tanque de mistura foi um dos fatores que motivaram o desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo é medir, indiretamente, o nível de um tanque usando um medidor de vazão de baixo custo. Para isso, optou-se por utilizar a malha de controle 31, destacada em verde na Figura 2. O medidor

de vazão de saída adicionado (em azul) foi denominado FT-31A, pois pertence a malha 31 e não possui o indicador.

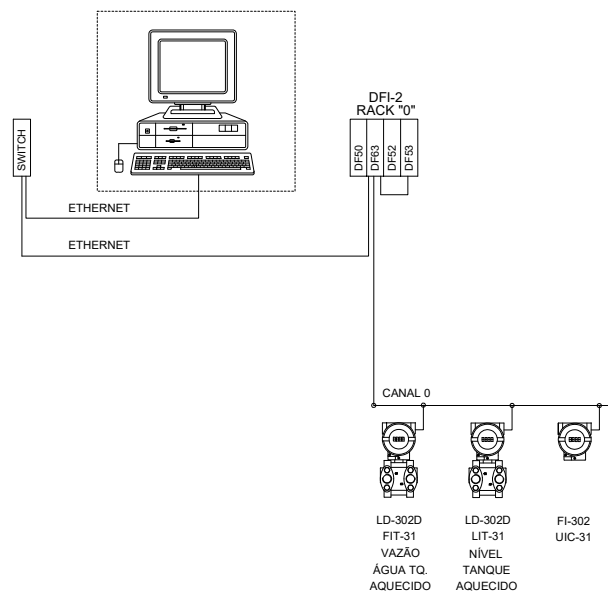
2.2 Rede de comunicação industrial

A planta piloto Smar PD3-F utiliza uma rede de comunicação Foundation Fieldbus. Trata-se de um sistema de comunicação serial, bidirecional e digital, projetado especificamente para uso em ambientes de automação industrial e fábricas, atuando como a rede de nível de campo.

Uma das vantagens de se utilizar esse tipo de rede é que sua arquitetura é aberta, sendo desenvolvida para substituir as conexões ponto a ponto (como o sinal analógico de 4 mA a 20 mA utilizado para controlar o inversor de frequência) por uma rede digital multiponto. A partir dessa configuração, múltiplos instrumentos de campo (sensores, atuadores, transmissores) podem se comunicar usando um único par de fios.

A arquitetura utilizada na planta é baseada no padrão Foundation Fieldbus HSE (do inglês, *High Speed Ethernet*). Esse tipo de rede pode operar com velocidades semelhantes às encontradas no padrão *ethernet* (100 Mbps), e pode ser utilizado para interligar controladores, servidores e instrumentos. Além disso, por meio de dispositivos específicos (*Linking Devices*), pode-se interligar dispositivos que operam usando o padrão Foundation Fieldbus H1 à rede Foundation Fieldbus HSE.

Figura 3 – Topologia da rede digital da planta piloto.



Fonte: adaptado de SMAR (2012).

A Figura 3 apresenta um diagrama esquemático contendo somente os equipamentos utilizados neste trabalho. Neste trabalho, sensores para medição de pressão diferencial

(Smar, modelo LD302D) foram utilizados para medir a vazão de entrada e o nível do tanque de aquecimento da planta piloto, e um módulo conversor (Smar, modelo FI302) foi empregado para converter sinais digitais, recebidos pela rede Foundation Fieldbus, em sinais de corrente analógicos (4 mA a 20 mA), aplicados na entrada de controle do inversor de frequência.

O rack apresentado na parte central do diagrama (Smar, modelo DFI302) é composto por um conjunto de módulos integrados, utilizados para o gerenciamento e controle dos dispositivos instalados na planta. O conjunto utilizado neste trabalho é composto pela fonte principal de alimentação (Smar, modelo DF50), fonte de alimentação para rede Foundation Fieldbus (Smar, modelo DF52), módulo controlador funcional (Smar, modelo DF63) e impedância de linha (Smar, modelo DF53) (SMAR, 2012).

O módulo DF63 foi projetado para aplicações que envolvem controle distribuído em redes e possui funções para configuração, análise, parametrização e aquisição de dados de dispositivos. Além disso, executa funções de *Linking Device* entre redes Foundation Fieldbus e HSE, podendo operar como um *gateway*.

O gerenciamento remoto da rede e dos dispositivos instalados na planta é feito por meio do *software* System302. Trata-se de uma plataforma digital que integra um conjunto de serviços baseados em padrões industriais abertos, que podem ser utilizados para desenvolver soluções customizáveis para cada tipo de aplicação.

Esse sistema possui uma série de recursos de conectividade e oferece funcionalidades para a troca de informações por meio de uma rede Ethernet. Para isso, o sistema conta com um servidor OPC (do inglês, *OLE for Process Control*), que possibilita o acesso remoto para aquisição de dados, configuração e parametrização de instrumentos a partir de *softwares* clientes. Neste trabalho, esse recurso foi utilizado para que o controle e o acesso aos dados adquiridos pelos instrumentos pudessem ser feitos remotamente, a partir do *software* MATLAB.

2.3 Atuadores hidráulicos

Uma motobomba centrífuga com motor periférico (KSB, modelo P500T) foi utilizada nos ensaios realizados neste trabalho. As características hidráulicas e elétricas dessa bomba (definida anteriormente como bomba 02) são apresentadas na Tabela 1.

Como mencionado, um inversor de frequência foi empregado para alimentar a bomba, que opera com tensão nominal de 220 V. De acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, para uma altura manométrica (mca) de 5 m, a vazão nominal da bomba seria de 2400 l/h. Ressalta-se que o valor nominal informado pelo fabricante é superior ao observado de fato na planta, pois essas informações não levam em consideração restrições, comprovadas por variações no diâmetro da tubulação e canos em curva instalados em diversas partes do sistema hidráulico da planta.

Tabela 1 – Dados de placa da bomba trifásica KSB, modelo P500T.

Vazão	até 2,7 m ³ /h
Altura manométrica	até 70 m
Temperatura de operação	até 80° C
Pressão de sucção	até 0,7 bar
Motor Trifásico	220/380 V
Potência	0,5 cv (368 W)
Rotação	3500 rpm
Grau de proteção do motor	IP44

Fonte: retirado de KSB (2023).

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 1, observa-se que a bomba apresenta um valor elevado de pressão de sucção (da ordem de 0,7 bar). Essa pressão elevada poderia causar problemas no circuito hidráulico da planta em casos de restrições muito elevadas, causadas, por exemplo, pelo fechamento de uma válvula manual em algum ponto estratégico do circuito.

Para garantir a segurança dos usuários e preservar a planta e a motobomba, foram inseridos tubos de alívio na saída da bomba e no topo dos tanques. Esses tubos não podem ser obstruídos e atuam em casos emergenciais, permitindo o escoamento do fluido excedente quando há um aumento de pressão além do valor estipulado como seguro para o sistema.

Como mencionado anteriormente, para controlar a vazão de saída da motobomba, utilizou-se um inversor de frequência. Antes de iniciar qualquer teste utilizando o conjunto inversor-motobomba, é fundamental realizar um processo de parametrização do sistema. Durante esse processo, definem-se os valores mínimo e máximo de frequência que devem ser aplicados à motobomba, considerando os valores mínimo e máximo de vazão desejada.

O sistema utilizado na planta permite que a bomba seja utilizada em condições nominais, ou seja, com vazão máxima. Dessa forma, pode-se ajustar a frequência máxima do inversor em 60 Hz. Entretanto, há um valor mínimo de frequência que deve ser aplicado à bomba para que o motor entre em operação. Esse limiar deve ser definido experimentalmente e depende de fatores como atrito, altura da coluna d'água, desgaste das engrenagens e lubrificação do sistema mecânico, por exemplo. Para a realização deste trabalho, foram utilizadas frequências entre 15 Hz e 60 Hz.

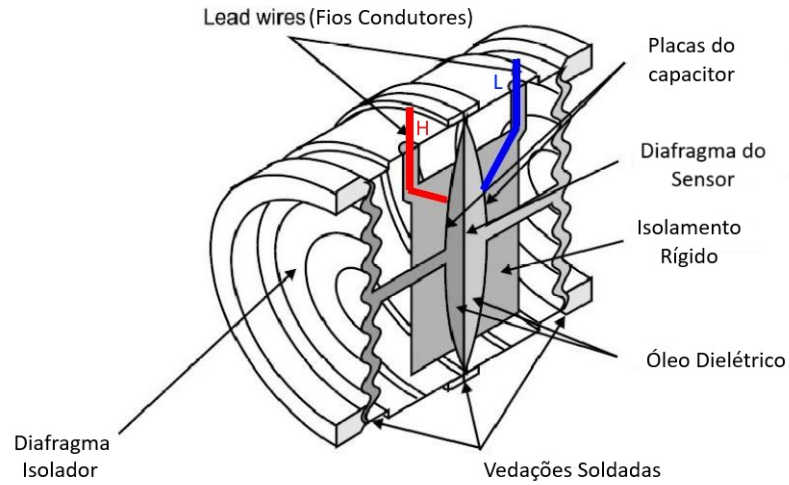
Após a definição dos parâmetros de frequência do inversor, deve-se parametrizar o módulo conversor FI-302 que pode ser visto na Figura 3. A partir dessa parametrização, define-se uma relação entre valores mínimos e máximos de corrente (4 mA a 20 mA), frequência (15 Hz a 60 Hz) e vazão de saída da bomba. Esses valores passam a ser representados por um número adimensional, cujos valores podem ser ajustados de forma arbitrária no intervalo entre 0 % e 100 %.

2.4 Módulo transmissor de pressão

O módulo LD302 é um transmissor capaz de operar em uma rede Foundation Fieldbus, empregado para transmitir medições de pressão diferencial, absoluta e manométrica. Esses dispositivos são utilizados na planta piloto nas aplicações que envolvem medições indiretas de vazão e nível, como as descritas neste trabalho.

Internamente, a medição da pressão diferencial é feita por meio de um sensor capacitivo, como o apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Representação em corte de um sensor capacitivo.



Fonte: adaptada pelo autor.

Pode-se calcular a capacitância entre as placas paralelas representadas na Figura a partir da expressão

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}, \quad (2.1)$$

sendo C a capacitância calculada [F], ϵ a permissividade do dielétrico [F/m], A a área da seção transversal das placas paralelas [m²], e d a distância entre as placas [m].

Dessa forma, considerando-se d_0 como distância inicial quando não há variação de pressão aplicada às extremidades do diafragma ($\Delta P = 0$), e definindo-se como Δd a deflexão do diafragma, pode-se definir os valores das capacitâncias de referência como

$$C_{HP} = \frac{\epsilon \cdot A}{d_0 - \Delta d}, \quad (2.2)$$

e

$$C_{LP} = \frac{\epsilon \cdot A}{d_0 + \Delta d}, \quad (2.3)$$

sendo C_{HP} e C_{LP} as capacitâncias [F] nas extremidades de maior e menor pressão, respectivamente.

A variação da capacitância entre as duas extremidades do sensor pode ser calculada por

$$\Delta C = \frac{\epsilon \cdot A}{d_0 - \Delta d} - \frac{\epsilon \cdot A}{d_0 + \Delta d}, \quad (2.4)$$

que, de forma simplificada, pode ser reescrita como:

$$\Delta C = \epsilon \cdot A \left(\frac{d_0 + \Delta d - d_0 + \Delta d}{d_0^2 - (\Delta d)^2} \right) = \epsilon \cdot A \left(\frac{2 \cdot \Delta d}{d_0^2 - (\Delta d)^2} \right). \quad (2.5)$$

Durante o funcionamento desses sensores, as faces dos diafragmas isoladores são submetidas a uma pressão diferencial, definidas neste trabalho como *HP* (alta pressão, do inglês *High Pressure*) e *LP* (baixa pressão, do inglês *Low Pressure*). A variação de pressão aplicada nas extremidades do diafragma ΔP provoca uma deflexão no diafragma, resultando numa variação da distância entre as placas Δd .

Assumindo-se que a deflexão do diafragma apresenta uma variação aproximadamente linear em relação à pressão diferencial aplicada dentro da faixa de operação do dispositivo, pode-se definir

$$\Delta d \approx k_d \cdot \Delta P, \quad (2.6)$$

sendo k_d uma constante que depende da geometria e rigidez do diafragma.

Dessa forma, pode-se reescrever a expressão para cálculo de ΔC como

$$\Delta C = \epsilon \cdot A \left(\frac{2 \cdot k_d \cdot \Delta P}{d_0^2 - (k_d \cdot \Delta P)^2} \right). \quad (2.7)$$

Em aplicações práticas, o deslocamento Δd costuma ser muito pequeno em comparação à distância inicial d_0 ($\Delta d \ll d_0$). Logo, pode-se simplificar a expressão anterior, considerando

$$d_0^2 - (\Delta d)^2 \approx d_0^2. \quad (2.8)$$

Aplicando esta aproximação, a relação anterior pode ser reescrita como

$$\Delta C \approx \left(\frac{2 \cdot \epsilon \cdot A \cdot k_d}{d_0^2} \right) \cdot \Delta P. \quad (2.9)$$

Definindo-se o termo k_s como uma constante de sensibilidade para o sensor, tem-se

$$k_s = \frac{2 \cdot \epsilon \cdot A \cdot k_d}{d_0^2}. \quad (2.10)$$

A expressão final, utilizada para representar a relação entre a pressão diferencial e a variação de capacitância no instrumento, pode ser definida por

$$\Delta C \approx k_s \cdot \Delta P, \quad (2.11)$$

podendo ser utilizada em aplicações práticas envolvendo medidores de pressão diferencial.

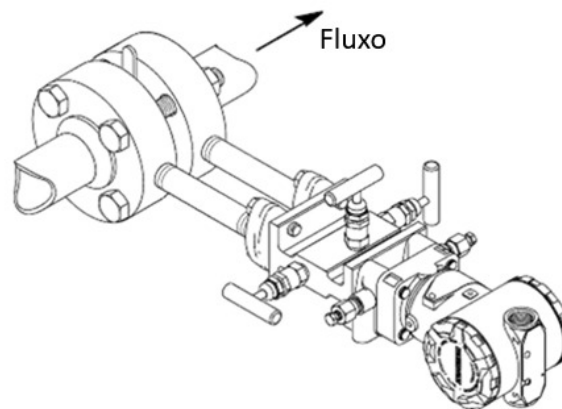
2.4.1 Medição de vazão

A vazão é uma das grandezas mais frequentemente avaliadas em processos industriais. Suas aplicações abrangem uma ampla gama de cenários, envolvendo desde medições de fluxo de água em estações de tratamento e residências, até medições de combustíveis e gases em refinarias de petróleo.

A seleção apropriada do instrumento para medir a vazão é determinada por diversos fatores, tais como tipo de material (líquido ou gás), as faixas de operação, e as condições de trabalho, incluindo temperatura e tipo de instalação do sensor.

Na planta piloto empregada neste trabalho, o módulo transmissor de pressão diferencial LD302D foi utilizado para medir as vazões de entrada dos dois tanques superiores: de aquecimento e de mistura. A Figura 5 apresenta um diagrama que representa o modo de instalação desses medidores na planta piloto.

Figura 5 – Modo de instalação de medidores de pressão diferencial aplicados à medição de vazão.



Fonte: adaptada pelo autor.

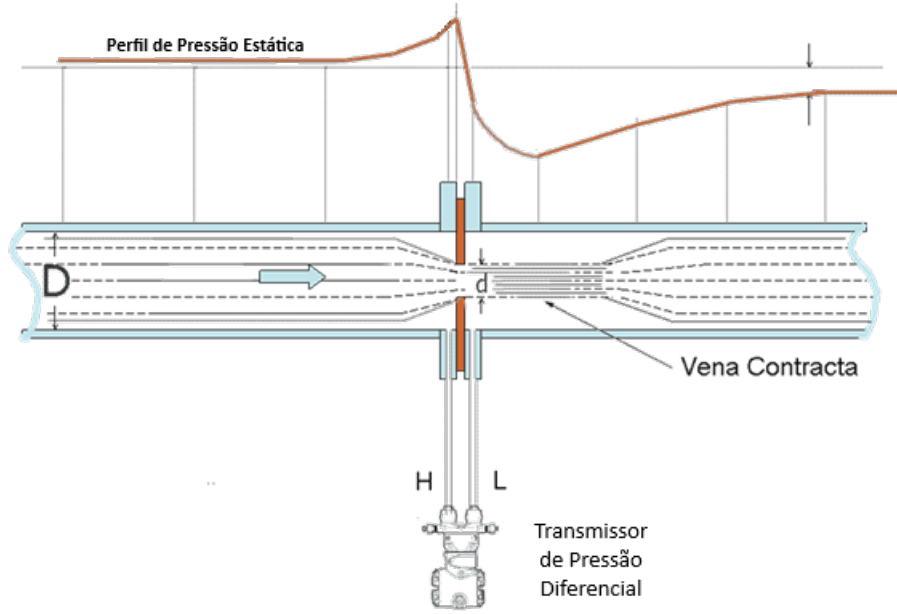
Nesse tipo de sistema, uma placa de orifício é utilizada para reduzir o diâmetro da tubulação num determinado ponto, restringindo o fluxo instantâneo de líquido que circula pelo sistema hidráulico. Essa restrição provoca um aumento instantâneo de pressão no momento em que o líquido encontra a placa de orifício, como pode ser visto na Figura 6.

A medição de vazão por pressão diferencial (ΔP) depende da relação entre a variação de pressão e a variação de velocidade quando o fluido passa por uma restrição (o orifício).

Para um escoamento incompressível em regime permanente, a vazão volumétrica Q é constante entre a seção 1 de diâmetro D (antes do orifício) e a seção 2 de diâmetro d (na *vena contracta*), o ponto de menor área após o orifício.

Matematicamente, pode-se representar essa relação a partir da equação da continuidade,

Figura 6 – Perfil de pressão do fluxo após a placa de orifício.



Fonte: adaptada pelo autor.

$$Q = A_D v_H = A_d v_L, \quad (2.12)$$

sendo Q a vazão volumétrica [m^3/s], A_D a área da seção transversal do tubo de diâmetro D [m^2], v_H a velocidade média do fluido na seção 1 [m/s], A_d a área da seção transversal na *vena contracta* [m^2] e v_L a velocidade média do fluido na seção 2 [m/s].

Utilizando a equação de Bernoulli, e assumindo que o escoamento é ideal e horizontal ($h_H \approx h_L$), tem-se

$$\frac{P_H}{\rho} + \frac{v_H^2}{2} = \frac{P_L}{\rho} + \frac{v_L^2}{2}, \quad (2.13)$$

sendo P_H e P_L as pressões estáticas nas seções 1 e 2 [Pa] e ρ a densidade do fluido [kg/m^3].

Essa expressão pode ser reescrita como:

$$\frac{P_H - P_L}{\rho} = \frac{v_L^2 - v_H^2}{2}. \quad (2.14)$$

Pode-se relacionar a diferença de pressão ($\Delta P = P_H - P_L$) à variação de vazão por meio da expressão

$$\frac{2\Delta P}{\rho} = v_L^2 - v_H^2. \quad (2.15)$$

Por meio da equação da continuidade, pode-se expressar a velocidade v_H como

$$v_H = v_L \left(\frac{A_d}{A_D} \right) = v_L \tau, \quad (2.16)$$

sendo $\tau = A_d/A_D$ a razão entre as áreas.

Substituindo-se 2.16 em 2.15, tem-se

$$\frac{2\Delta P}{\rho} = v_L^2 - \left(v_L \frac{A_d}{A_D}\right)^2 = v_L^2 \left[1 - \left(\frac{A_d}{A_D}\right)^2\right]. \quad (2.17)$$

Essa equação pode ser reescrita isolando-se a velocidade v_L , ou seja,

$$v_L = \sqrt{\frac{2\Delta P/\rho}{1 - (A_d/A_D)^2}}. \quad (2.18)$$

Aplicando-se novamente a equação da continuidade, a vazão volumétrica teórica Q pode ser definida por

$$Q = A_d v_L. \quad (2.19)$$

Combinando-se as duas últimas expressões, tem-se

$$Q = A_d \sqrt{\frac{2\Delta P/\rho}{1 - (A_d/A_D)^2}}. \quad (2.20)$$

Em geral, a vazão real (Q_r) é menor que a teórica (Q) devido a fatores como perdas por atrito, por exemplo. Para ajustar a vazão teórica à vazão real, pode-se simplificar a expressão usando a área do orifício (A_d) e a razão de diâmetros $\beta = d/D$. Para isso, pode-se definir o coeficiente de vazão

$$k_Q = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (2.21)$$

sendo C_d o coeficiente de descarga, e $\beta^4 = (A_d/A_D)^2$.

Nessa expressão, o coeficiente de descarga é definido como a razão entre a vazão real e a vazão teórica.

A partir dessa definição, a equação prática para a determinação da vazão volumétrica real pode ser definida como

$$Q_r = k_Q \cdot A_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}. \quad (2.22)$$

2.4.2 Medição de nível

A medição de nível em processos industriais consiste em quantificar, por meio de monitoramento contínuo ou discreto, a quantidade de material presente num tanque (MORAES; COSTA, 2013).

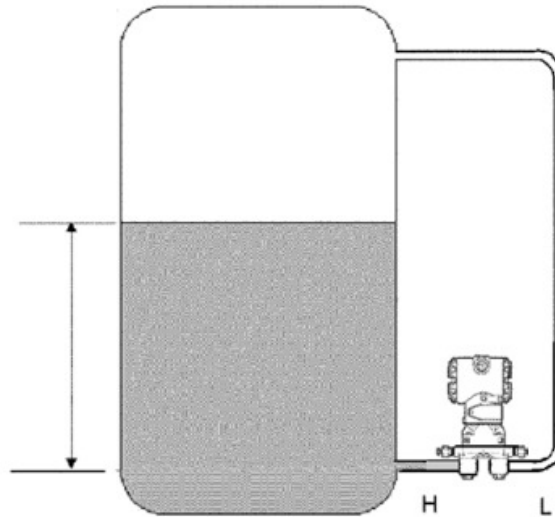
A escolha do sistema de medição adequado requer considerar vários fatores, tais como as características específicas da aplicação, o tipo de produto cujo nível se deseja

medir, a precisão e os custos envolvidos, entre outros. Dessa forma, existe uma ampla variedade de sistemas de medição de nível disponíveis, cada um com suas próprias vantagens e limitações (MORAES; COSTA, 2013).

Os instrumentos de medição de nível podem ser classificados conforme o método de medição utilizado, que pode ser direto ou indireto. Nesse contexto, o módulo transmissor de pressão LD302 pode ser utilizado para realizar medições indiretas de nível, utilizando como referência a diferença de pressão entre dois pontos distintos de um tanque.

Medidores com essas características podem ser instalados em tanques abertos ou pressurizados. A Figura 7 apresenta um exemplo de instalação de um sensor com essas características num tanque fechado (pressurizado).

Figura 7 – Sistema de medição de nível por pressão diferencial instalado em tanque fechado.



Fonte: retirado de ??).

A conexão hidráulica entre medidor e o tanque é feita utilizando dois tubos, definidos na imagem como H (do inglês, *high pressure*) e L (do inglês, *low pressure*).

Para determinar a altura h de um determinado líquido em um tanque fechado, utiliza-se a relação entre a pressão hidrostática e a diferença de pressão medida entre a base e o topo do reservatório.

Neste trabalho, considera-se a água como um líquido de interesse. Considera-se inicialmente que o fluido de interesse é incompressível e possui densidade constante (ρ) em repouso. A equação de Bernoulli entre os dois pontos medidos (H e L) pode ser definida como

$$P_L + \frac{1}{2}\rho v_L^2 + \rho g h_L = P_H + \frac{1}{2}\rho v_H^2 + \rho g h_H, \quad (2.23)$$

sendo P a pressão estática [Pa], v a velocidade do fluido [m/s] (neste caso, $v_H = v_L = 0$), g a aceleração da gravidade [m/s²] e h a elevação vertical [m].

Como ilustrado na Figura 7, o ponto P_H representa a base do tanque ($h_H = 0$) e o ponto P_L representa a superfície do líquido ($h_L = h$). Substituindo-se esses valores na equação anterior, tem-se

$$P_H = P_L + \rho gh. \quad (2.24)$$

A diferença de pressão (ΔP) medida por um transmissor diferencial, obtida a partir da medição da diferença entre a pressão da base e a pressão do topo do tanque, pode ser definida como:

$$\Delta P = P_H - P_L. \quad (2.25)$$

Dessa forma, a relação hidrostática pode ser reescrita como

$$\Delta P = \rho gh. \quad (2.26)$$

Isolando-se a variável h , tem-se a expressão

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g}, \quad (2.27)$$

que pode ser utilizada para determinar o nível do tanque.

Para um cenário dinâmico, onde o fluido está em movimento, deve-se considerar as diferenças de velocidade do fluido nos dois pontos de medição e as perdas por atrito. Ao incluir esses parâmetros, a expressão para o cálculo de h passa a ser definida como

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{v_L^2 - v_H^2}{2g} + k_L, \quad (2.28)$$

sendo k_L o coeficiente utilizado para representar a perda de carga total, e definido pela relação de Darcy-Weisbach, ou seja,

$$k_L = \left(f_a \frac{L}{D} + \sum k_v \right) \frac{v^2}{2g}, \quad (2.29)$$

sendo f_a o fator de atrito, L o comprimento [m], $v = \frac{Q}{A}$ a velocidade média do fluxo [m/s], e k_v o coeficiente de perda localizada para válvulas, curvas e conexões.

A perda de carga total (k_L) é a soma das perdas distribuídas e localizadas, expressas em termos da carga cinética ($\frac{v^2}{2g}$).

O regime de escoamento do fluido pode ser determinada a partir do número de Reynolds (Re), uma grandeza adimensional que representa a razão entre as forças inerciais e viscosas. Esse parâmetro pode ser definido como

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}, \quad (2.30)$$

sendo μ a viscosidade dinâmica do fluido [Pa · s].

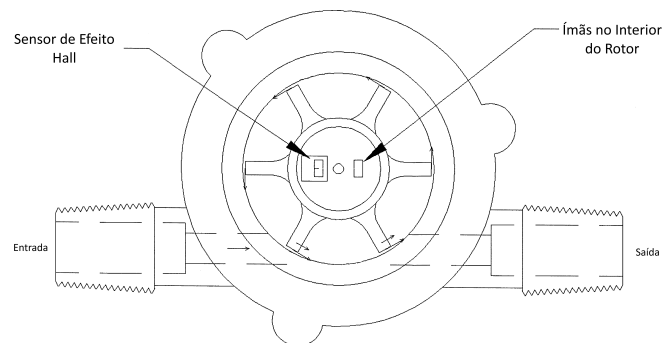
Para $Re < 2300$, o escoamento é definido como laminar. Nesse cenário, as forças viscosas predominam, e o fator de atrito pode ser aproximado por $f_a \approx \frac{64}{Re}$. A faixa $2300 \leq Re \leq 4000$ define uma região de transição, onde o comportamento do escoamento é instável. Finalmente, para valores de $Re > 4000$, o escoamento passa a ser turbulento. Nesse cenário, as forças de inércia predominam, e o fator de atrito passa a depender da rugosidade relativa (ϵ/D). A análise apresentada neste trabalho considera que o escoamento do fluido é laminar, ou seja, $Re < 2300$.

2.5 Sensor de vazão tipo turbina

Neste trabalho, um sensor de vazão do tipo turbina foi utilizado para determinar a vazão de saída de um dos tanques da planta piloto. O sensor instalado, definido como FIT-33, foi representado na Figura 2.

Sensores de vazão do tipo turbina são dispositivos projetados para realizar a medição da vazão de líquidos utilizando o princípio da turbina rotativa, com detecção magnética por efeito Hall. Em geral, são sensores de baixo custo, frequentemente empregados em sistemas de monitoramento de fluxo devido à fácil integração e bom desempenho para aplicações de pequeno e médio porte. A Figura 8 apresenta um desenho do sensor utilizado neste trabalho (modelo YF-S201).

Figura 8 – Desenho mecânico do sensor YF-S201.



Fonte: adaptada pelo autor.

Internamente, o sensor possui uma hélice plástica que gira livremente com a passagem do fluido. Essa hélice possui um ímã permanente que, ao girar, produz variações no campo magnético próximo a um sensor do tipo Hall, fixado na parte externa da câmara de medição. O sensor Hall é responsável por detectar essas mudanças no campo magnético e converter essa informação em pulsos elétricos. Cada rotação da hélice gera um número fixo de pulsos, e a frequência desses pulsos está diretamente associada à quantidade de líquido que passa pelo sensor. Dessa forma, a partir da medição da frequência de rotação da hélice, pode-se calcular a vazão instantânea e, por consequência, o volume total em um período.

O princípio de operação desses sensores baseia-se na proporcionalidade entre a velocidade média axial do fluido e a velocidade angular do rotor. Matematicamente, a vazão de um fluido pode ser definida como

$$Q = A \cdot v. \quad (2.31)$$

A velocidade linear tangencial (v_p) na ponta da pá de um rotor pode ser definida por

$$v_p = R \cdot \omega, \quad (2.32)$$

sendo R o raio efetivo do rotor [m] e ω a velocidade angular do rotor [rad/s].

Em um modelo ideal, a relação entre a velocidade média do fluido e a velocidade das pás pode ser determinada pela geometria da hélice. Dessa forma,

$$\frac{v}{v_p} = \tan(\alpha), \quad (2.33)$$

sendo α onde o ângulo entre as pás da hélice [rad].

A partir dessa relação, a expressão para o cálculo da velocidade média do fluido pode ser reescrita como

$$v = R \cdot \omega \cdot \tan(\alpha). \quad (2.34)$$

Conforme mencionado anteriormente, a saída do medidor é representada por meio de um conjunto de pulsos, gerados a partir da rotação da hélice em função da velocidade de escoamento do fluido.

Para um rotor com N pás, a frequência do sinal de saída gerado (f) pode ser definida como

$$f = \frac{N}{2\pi} \cdot \omega. \quad (2.35)$$

Substituindo-se ω em 2.34, tem-se

$$v = R \cdot \left(\frac{2\pi}{N} \cdot f \right) \cdot \tan(\alpha). \quad (2.36)$$

A partir desse resultado, a expressão para cálculo da vazão pode ser reescrita como

$$Q = A \cdot v = \left[A \cdot R \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot \tan(\alpha) \right] \cdot f. \quad (2.37)$$

O termo representado entre colchetes é uma constante geométrica, que pode ser definida por

$$k_g = \frac{1}{A \cdot R \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot \tan(\alpha)}, \quad (2.38)$$

onde k_g representa uma relação de pulsos por volume. A partir dessa relação, pode-se reescrever a expressão para cálculo da vazão como

$$Q = \frac{f}{k_g}. \quad (2.39)$$

Na prática, os efeitos do atrito viscoso e arrasto aerodinâmico (ou hidrodinâmico) entre o fluido e o rotor, além do atrito nos mancais, afetam o desempenho ideal do sistema de medição. Portanto, o fator k real utilizado em medições industriais deve ser determinado a partir de um processo de calibração experimental, realizado sob condições controladas.

Os fatores de perda reduzem a velocidade angular real do rotor (ω_r) em relação à velocidade ideal. Devido às perdas, a velocidade angular real do rotor é menor do que a velocidade prevista pela geometria e a vazão, ou seja,

$$\omega_r < \omega. \quad (2.40)$$

Para casos onde considera um escoamento laminar, o número de Reynolds pode ser utilizado para determinar esse fator de perdas. Dessa forma, o fator k real, obtido a partir de um procedimento de calibração, pode ser representado como

$$k = K(Re), \quad (2.41)$$

sendo $K(Re)$ uma função empregada para calcular o fator k real a partir do número Re .

A expressão utilizada para o cálculo da vazão em medidores de turbina pode ser reescrita como

$$Q = \frac{f}{K(Re)}. \quad (2.42)$$

Em geral, o fator k é fornecido pelo fabricante por meio de uma curva de calibração (k vs. Re ou k vs. f), que é essencial para garantir a precisão do medidor em toda a sua faixa operacional.

2.6 Métodos de medição

Sistemas de medição podem ser utilizados de forma direta ou indireta. Essa configuração depende do princípio físico do sensor utilizado e do tipo de grandeza que se deseja medir.

No método de medição direta, o instrumento é utilizado para medir diretamente a grandeza a ser quantificada. Como exemplo, pode-se citar os casos envolvendo a medição de distâncias por meio de trenas e réguas. Trata-se de uma abordagem mais simples, que não exige a utilização de outras informações sobre o sistema para compor o cálculo.

Para casos em que não se pode determinar uma grandeza de forma direta, são utilizadas técnicas de medição indireta. Nessa abordagem, a grandeza medida passa a ser empregada como parâmetro de entrada de uma função matemática, cuja saída representa o valor da grandeza que se deseja medir (MORAES; COSTA, 2013). Na indústria, os transmissores de pressão diferencial são amplamente utilizados para a medição de nível. Como mencionado anteriormente, eles medem a diferença de pressão entre dois pontos específicos de um tanque ou uma tubulação. Esses valores de pressão podem ser convertidos em medições de vazão ou nível por meio de uma curva de calibração (BEGA, 2006).

A utilização de transmissores de pressão diferencial apresenta uma vantagem significativa, por permitir realizar medições independentemente da geometria do tanque, seja ele aberto ou fechado. Além disso, os dados medidos pelo transmissor podem ser posteriormente processados e analisados.

Uma das desvantagens de se utilizar os transmissores de pressão diferencial em tanques fechados envolve a possível variação da pressão interna devido a alguns fatores, tais como a elevação da temperatura do líquido, por exemplo.

Além disso, há desafios em relação ao processo de limpeza e manutenção desses sensores, além da dificuldade de realizar medições para casos específicos, envolvendo emulsões e suspensões, por exemplo. Essas variações podem comprometer os resultados obtidos, devendo ser eliminadas a fim de minimizar as incertezas, garantindo maior precisão e confiabilidade ao longo do processo de medição (AGUIRRE, 2004).

2.6.1 Determinação do nível de um tanque a partir do volume acumulado

A determinação do nível (h) em tanques fechados, a partir da relação entre as vazões de entrada (Q_{in}) e saída (Q_{out}) pode ser obtida a partir do balanço de massas para um volume de controle. Nessa abordagem, a taxa de acúmulo pode ser definida como

$$\text{Taxa de Acúmulo} = \text{Taxa de Entrada} - \text{Taxa de Saída.} \quad (2.43)$$

Define-se o volume total V [m³] como:

$$V = A_T \cdot h. \quad (2.44)$$

sendo A_T a área do tanque [m²]. A expressão que define o balanço de massas pode ser escrita como:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t), \quad (2.45)$$

sendo $\frac{dV}{dt}$ a variação do volume em função do tempo.

Assumindo que a área da seção transversal do tanque (A_T) é constante (caso típico de um tanque cilíndrico), tem-se

$$\frac{d(A_T \cdot h)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t). \quad (2.46)$$

Essa expressão pode ser reescrita como:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in}(t) - Q_{out}(t)}{A_T}. \quad (2.47)$$

A representação dessa expressão em forma discreta no tempo é crucial para a simulação computacional e para a implementação usando sistemas eletrônicos embarcados.

Para isso, a variação do volume do tanque (ΔV) em função do tempo pode ser representada por

$$\Delta V(t) = V(t + \Delta t) - V(t). \quad (2.48)$$

O balanço de massas no intervalo de tempo Δt pode ser definido por

$$V(t + \Delta t) - V(t) = Q_{in}(\Delta t) - Q_{out}(\Delta t) \quad (2.49)$$

Assumindo que Q_{in} e Q_{out} são constantes no intervalo Δt , pode-se relacionar o volume acumulado aos parâmetros físicos do tanque a partir da expressão

$$A_T \cdot (h(t + \Delta t) - h(t)) = Q_{in}(\Delta t) - Q_{out}(\Delta t). \quad (2.50)$$

Isolando o termo h , tem-se

$$h(t + \Delta t) = h(t) + \frac{1}{A_T} \cdot (Q_{in}(\Delta t) - Q_{out}(\Delta t)). \quad (2.51)$$

Esta equação permite calcular o nível futuro $h(t + \Delta t)$ a partir do nível atual $h(t)$ e das vazões Q_{in} e Q_{out} em função do intervalo de tempo Δt .

2.6.2 Determinação do nível de um tanque a partir da medição da vazão de saída

A relação entre a altura da coluna de líquido em um tanque fechado e sua vazão de saída pode ser obtida a partir da equação de Bernoulli, sob a suposição de escoamento em regime permanente e fluido ideal.

Para essa análise, conforme ilustrado na Figura 7, são considerados dois pontos numa linha de corrente, sendo P_L o ponto referente a superfície livre do líquido no tanque, e P_H o ponto central do tubo de saída.

Para essas condições, a equação de Bernoulli pode ser definida por

$$\frac{P_L}{\rho g} + \frac{v_L^2}{2g} + h_L = \frac{P_H}{\rho g} + \frac{v_H^2}{2g} + h_H + k_L, \quad (2.52)$$

sendo k_L o fator utilizado para representar as perdas de carga.

Assim como no caso apresentado anteriormente, considera-se $h_H = 0$ e $h_L = h$. Além disso, para tanques grandes, a velocidade de descida da superfície é desprezível em relação à velocidade de saída, ou seja, $v_L \approx 0$. Para o caso envolvendo um tanque fechado, considera-se P_L como a pressão no gás acima do líquido, e P_H a pressão na saída de líquido do tanque.

A equação de Bernoulli pode ser reescrita como

$$\frac{P_L}{\rho g} + \frac{(0)^2}{2g} + h = \frac{P_H}{\rho g} + \frac{v_H^2}{2g} + 0 + k_L. \quad (2.53)$$

O termo referente a velocidade de saída pode ser isolado, ou seja,

$$\frac{v_H^2}{2g} = h + \frac{P_L - P_H}{\rho g} - k_L. \quad (2.54)$$

Rearranjando e simplificando a expressão, pode-se definir a velocidade de saída do fluido como

$$v_H = \sqrt{2g \left(h + \frac{P_L - P_H}{\rho g} - k_L \right)}. \quad (2.55)$$

A vazão volumétrica pode ser calculada a partir do produto da área de saída (A_H) pela velocidade de saída (v_H), ou seja,

$$Q = A_H \cdot v_H. \quad (2.56)$$

Substituindo 2.55 em 2.56 resulta em

$$Q = A_H \sqrt{2g \left(h + \frac{P_L - P_H}{\rho g} - k_L \right)}. \quad (2.57)$$

Dessa forma, a equação de Bernoulli pode ser reescrita como

$$\frac{P_L}{\rho g} + h = \frac{P_H}{\rho g} + \frac{Q^2}{2gA_H^2} + k_L. \quad (2.58)$$

Isolando-se a variável altura (h), a equação pode ser definida como

$$h = \frac{Q^2}{2gA_H^2} + \frac{P_H - P_L}{\rho g} + k_L. \quad (2.59)$$

Essa expressão relaciona a altura da coluna de líquido (h) com a vazão de saída (Q), considerando as perdas de carga definidas por k_L .

2.7 Técnicas para calibração de sistemas de medição

A calibração de sistemas de medição é um processo essencial para garantir a precisão e a confiabilidade das medições realizadas por instrumentos e dispositivos de medição.

Esse procedimento envolve comparar as leituras do instrumento a ser calibrado com as leituras de um padrão de referência conhecido e estabelecido, a fim de determinar e corrigir eventuais desvios (AGUIRRE, 2004).

Para calibração do sensor de vazão de saída, será utilizado como referência o medidor de vazão presente na planta piloto, o FIT-31. A calibração de sistemas de medição é crucial em diversos setores, incluindo indústrias manufatureiras, laboratórios de pesquisa, setor de saúde e muitos outros, onde a precisão das medições desempenha um papel fundamental na qualidade e conformidade de produtos e serviços (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

2.7.1 Calibração estática

A calibração estática de instrumentos estabelece uma relação entre o mensurando, que representa a entrada, e o resultado do sensor de saída. A partir dos dados adquiridos, assumindo que o procedimento foi repetido algumas vezes, pode-se extrair um conjunto de características a partir desse tipo de ensaio, tais como linearidade, sensibilidade, exatidão, histerese, entre outros parâmetros (AGUIRRE, 2004).

Além disso, essas informações podem ser utilizadas nos cálculos das incertezas oriunda de diversos fatores relacionados ao sistema.

Essa análise considera que um sinal ($y(t)$), obtido a partir da medição de um parâmetro de saída de um sistema, pode ser relacionado à um sinal de entrada ($x(t)$). Entretanto, somam-se ao sinal de entrada de interesse sinais de interferência ($x_i(t)$) e sinais modificantes ($x_m(t)$), que afetam o instrumento negativamente.

Esse comportamento pode ser representado matematicamente a partir da expressão

$$y(t) = f[x(t), x_i(t), x_m(t)], \quad (2.60)$$

$$= f_o[x_o(t)] + g[x_i(t)] \quad (2.61)$$

Ressalta-se que a função f_o apresenta propriedades dinâmicas, mas nesta seção, somente as propriedades estáticas serão consideradas. Dessa forma, sendo f_e a parcela estática de f_o , tem-se

$$f_e = \lim_{x \rightarrow \infty} f_o(x). \quad (2.62)$$

A partir de informações provenientes de uma curva de calibração, pode-se relacionar sinais de entrada e saída. Essa curva pode ser obtida a partir da relação de diversos pontos de entrada ($\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$) e saída ($\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$). Ressalta-se que o termo x_i representa o comportamento de $x(t)$ em regime estacionário. Dessa forma,

$$x_i = \lim_{x \rightarrow \infty} x(t). \quad (2.63)$$

Para se identificar a curva de calibração de um instrumento, é necessário que a saída do sensor possa ser representada a partir de uma expressão do tipo

$$y_i = f_e[x_i] + \epsilon, \quad (2.64)$$

sendo ϵ uma variável aleatória.

Além disso, deve-se assumir que existe um único valor de x_i relacionado à y_i , garantindo que f_e seja invertível, ou seja

$$x_i \approx f_e^{-1}[y_i]. \quad (2.65)$$

Finalmente, a função f_e deve ser invariante no tempo, de modo a não apresentar alterações ao longo do período de operação do instrumento.

Assumindo que ϵ representa uma variável com comportamento aleatório, e que f_e deve ser invertível, tem-se

$$x_i = f_e^{-1}[y_i - \epsilon] \quad (2.66)$$

$$= f_e^{-1}[y_i] + \epsilon_c. \quad (2.67)$$

Para uma melhor confiabilidade, torna-se necessário a calibração periódica dos instrumentos, uma vez que as propriedades físicas dos materiais que compõe os instrumentos podem variar com o tempo.

O comportamento da função que define a relação entre as informações de entrada e saída pode variar conforme o tipo de sensor utilizado. Para aplicações envolvendo sistemas lineares, pode-se utilizar uma função de primeira ordem, representada por

$$y = p + \alpha x, \quad (2.68)$$

sendo x e y as variáveis de entrada e saída, α o coeficiente angular, e p uma constante.

Incluindo-se nessa expressão os erros provocados por entradas espúrias (ϵ_i), tem-se

$$y_i = \hat{p} + \hat{\alpha}x_i + \epsilon_i \quad (2.69)$$

sendo $\hat{p}$ e $\hat{\alpha}$ valores estimados.

Essa análise considera que os valores de x_i são conhecidos, e que todos os erros mencionados anteriormente estão incluídos na variável de saída y_i . O somatório desses erros pode ser calculado a partir da expressão

$$(\hat{p}, \hat{\alpha}) = \underset{i=1}{\operatorname{argmin}} \sum^N \epsilon_i^2. \quad (2.70)$$

Dessa forma, utilizando-se o método dos mínimos quadrados, pode-se determinar os valores de $\hat{p}$ e $\hat{\alpha}$ a partir das expressões

$$\hat{\alpha} = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.71)$$

e

$$\hat{p} = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i y_i \sum x_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \quad (2.72)$$

2.7.2 Calibração Dinâmica

A calibração dinâmica se faz necessária quando a calibração estática não é suficiente para coletar informações específicas do sistema. Nessa abordagem, considera-se uma variação periódica do sinal de entrada, e comparam-se os efeitos dessa entrada às variações da saída do sistema.

Neste trabalho, para a calibração dinâmica do medidor de vazão do tipo turbina, foram utilizadas inicialmente formas de onda quadradas, por meio da aceleração e desaceleração da bomba controlada por meio de um inversor de frequência.

Para a validação dos resultados e caracterização dinâmica do sistema de medição indireta do nível, optou-se por utilizar sinais de referência senoidais. Essa metodologia de testes foi proposta por Sorli, Figliolini e Pastorelli (2004). Em seu trabalho, os autores tinham como objetivo caracterizar o comportamento dinâmico de válvulas eletropneumáticas.

Neste trabalho, essa proposta foi adaptada para que fosse possível caracterizar o comportamento dinâmico dos medidores tipo turbina em aplicações relacionadas a medição de vazão e nível em tanques industriais.

2.8 Considerações parciais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente, apresentou-se a planta didática Smar PD3-F, destacando-se os instrumentos de medição e atuadores utilizados ao longo das etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Na sequência, foram apresentados os conceitos físicos necessários para a compreensão do princípio de funcionamento dos medidores de vazão e nível que utilizam o método de medição por pressão diferencial, e dos medidores de vazão do tipo turbina, destacando-se as principais características, vantagens e desvantagens de cada caso.

Além disso, foram descritas técnicas de medição indiretas que podem ser utilizadas para a determinação do nível de tanques industriais a partir dos métodos do balanço de massas da vazão de saída.

Finalmente, foram apresentadas técnicas utilizadas para calibrar e caracterizar sistemas de medição, usando abordagens estáticas e dinâmicas.

3 Caracterização de medidores de vazão do tipo turbina

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são descritas as etapas de configuração da planta piloto, necessárias para a realização do monitoramento e controle remoto dos instrumentos a partir do acesso a um servidor OPC.

Em seguida, são descritos os procedimentos de instalação e configuração do medidor de vazão do tipo turbina. Além disso, são descritas as etapas de configuração de *software* necessárias para sincronizar o processo de aquisição e controle dos instrumentos de forma remota, por meio do *software* MATLAB.

Finalmente, apresenta-se o procedimento adotado para calibrar o medidor de vazão de forma estática e dinâmica, utilizando como referência valores de vazão medidos a partir do medidor FIT-31, presente na planta piloto. Os valores obtidos foram comparados aos fornecidos pelo fabricante e validados por meio de um ensaio dinâmico.

3.1 Configuração da planta piloto

Para a realização dos ensaios, a configuração da planta piloto foi dividida em duas etapas. Na primeira, desenvolveu-se um *software* em ambiente MATLAB para que fosse possível controlar os instrumentos de medição e os atuadores presentes na planta piloto de forma remota.

Na segunda etapa, um sensor de vazão do tipo turbina foi instalado no tubo de saída do tanque de aquecimento da planta piloto, e um microcontrolador foi utilizado para monitorar a frequência de saída gerada pelo medidor durante seu funcionamento.

3.1.1 Configuração do acesso remoto à planta usando MATLAB e servidor OPC

Na aplicação proposta neste trabalho, o *software* MATLAB foi utilizado como cliente, acessando o servidor OPC por meio do *OPC Toolbox*. Essa configuração foi utilizada para monitorar e controlar os dispositivos remotamente, por meio de algoritmos executados em tempo real a partir de um computador pessoal.

Para isso, inicialmente é necessário conectar os *hard keys*, responsáveis por armazenar as licenças do *software* proprietário SMAR System302 ao computador. Em seguida, é necessário abrir o *software* System302, inicializar a comunicação entre a planta e o computador pessoal e, finalmente, inicializar o servidor OPC.

Uma vez inicializado, o servidor OPC pode ser acessado por qualquer *software* cliente que suporte o protocolo de comunicação. Neste trabalho, o MATLAB foi escolhido por se tratar de um *software* amplamente utilizado, mas alternativas *open source*, como Python, também poderiam ser utilizadas.

É necessário fornecer ao MATLAB o endereço do servidor OPC ao qual se deseja conectar, bem como o nome dos *tags* que se deseja acessar. Uma vez conectado, pode-se enviar ou receber informações de forma remota por meio desse software. Apesar de se tratar de uma plataforma aberta, o servidor OPC utilizado é parte do *software* proprietário System302. Dessa forma, para que seja possível estabelecer uma comunicação entre o computador pessoal e a planta piloto por meio do MATLAB, é necessário manter o *software* System302 aberto em segundo plano.

Um ponto importante observado ao longo dos ensaios diz respeito a latência entre o envio de comandos a partir do computador e o retorno de informações dos sensores. Experimentalmente, observou-se que esses tempos são baixos para operações de leitura (da ordem de 500 ms) e altos para operações de escrita (1 s a 3 s, dependendo do instrumento). Esse pode ser um problema para aplicações de controle, que teriam seu período de atualização limitado ao maior intervalo de tempo observado ao longo dos ensaios.

3.1.2 Parametrização do inversor de frequência

Devido as especificações técnicas da motobomba empregada na planta piloto, é necessário aplicar uma frequência mínima de 15 Hz ao motor trifásico utilizado para que o sistema comece a bombear água pela tubulação. Dessa forma, para evitar uma região de zona morta, optou-se por parametrizar o inversor de frequências, considerando uma faixa de operação entre 15 Hz e 60 Hz, representada no *software* System302 por valores percentuais entre 0 % e 100 %.

Nessa configuração, o valor mínimo (15 Hz) garante uma vazão mínima, suficiente para preencher parte da tubulação com água, mas sem elevar o nível do tanque de aquecimento. Para a frequência máxima (60 Hz), a bomba passa a operar com vazão nominal, garantindo a vazão máxima.

Testes preliminares mostraram que a variação da vazão em função da frequência ajustada no inversor apresenta comportamento linear. Essa configuração foi utilizada ao longo de todo o trabalho.

3.1.3 Instalação do sensor

Como mencionado anteriormente, a planta piloto possui sensores para monitoramento da vazão de entrada dos tanques, mas não foram adicionados sensores de vazão ou válvulas de controle nas saídas dos tanques. Além disso, o sistema não possui um sensor de

nível para o tanque de mistura, operando somente em alguns pontos específicos definidos a partir da abertura de válvulas manuais.

A fim de monitorar o nível do tanque de mistura indiretamente, neste trabalho propõe-se instalar sensores de vazão do tipo turbina (Sea, modelo YF-S201) na saída do tanque de aquecimento da planta. A Figura 9 apresenta uma foto do sensor instalado, em que se observa que foi necessário adicionar um tubo de PVC para acoplar o sensor ao cano de saída do tanque de aquecimento. Essa adaptação foi necessária, pois o sensor escolhido não possui índice de proteção para operar submerso. Além disso, também foi necessário reduzir o diâmetro da tubulação de saída para 1/2 polegada, que é o diâmetro das conexões de entrada e saída do sensor de vazão.

Figura 9 – Foto do sensor de vazão YF-S201 instalado na tubulação de saída do tanque de aquecimento da planta SMAR PD3-F.



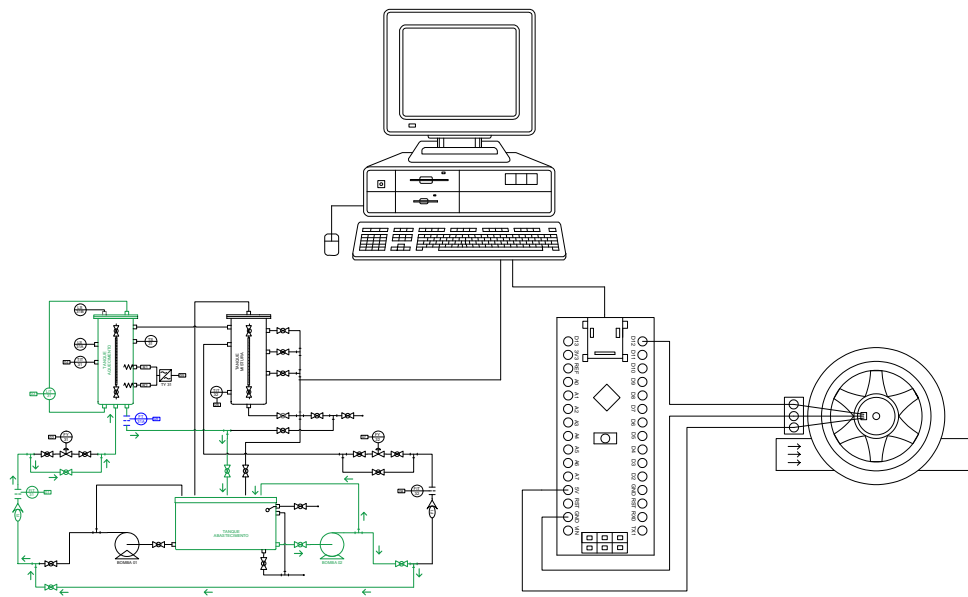
Fonte: Do autor.

Essas alterações contribuem de forma significativa para o aumento das perdas de carga do sistema hidráulico. Entretanto, é importante destacar que, por se tratar de um equipamento didático utilizado por outras disciplinas, a planta não pode ser modificada. Dessa forma, a adaptação dessas conexões foi a opção encontrada para desenvolver os ensaios ao longo deste trabalho.

Conforme mencionado anteriormente, os sensores de vazão do tipo turbina apresentam baixo custo e facilidade de instalação. Como desvantagens, pode-se citar o erro elevado (até 5%) e a resistência hidráulica causada pelas pás, responsável por elevar a perda de carga no circuito hidráulico.

Um microcontrolador (Microchip Technology, modelo Atmega328p) foi utilizado para medir a frequência de pulsos gerados pelo medidor em função da vazão de saída do tanque. Para isso, inicialmente os terminais de alimentação do sensor YF-S201 foram energizados utilizando os terminais de alimentação do próprio microcontrolador (5 V e GND) conforme pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de conexão do sistema.



Fonte: Do autor.

Em seguida, o terminal de saída do sensor foi conectado a um pino de entrada do microcontrolador, previamente configurado como uma entrada digital de propósito geral com resistor de *pull-up*. Essa configuração garante que o sinal de entrada permaneça em nível alto, a menos que o terminal de saída do sensor force um nível de tensão baixo.

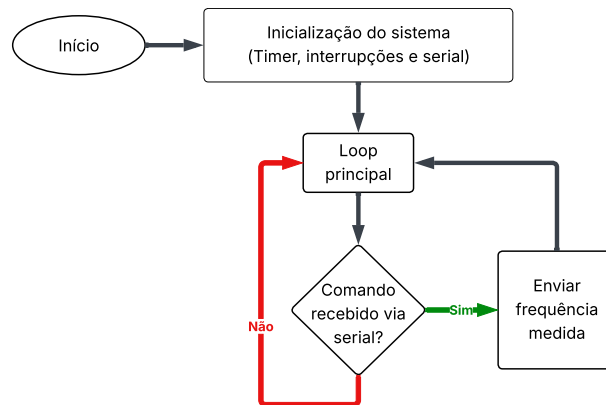
Uma interrupção de *hardware* foi usada para contar o número de bordas de descida recebidas a partir do terminal de saída do sensor, e um temporizador foi empregado para marcar um intervalo de tempo de 1 s. A cada nova interrupção gerada, um contador, inicialmente definido como zero, era incrementado.

Após o intervalo de tempo pré-definido, o valor da contagem era copiado para uma variável auxiliar e o contador era zerado, reiniciando o processo. Os dados armazenados na variável auxiliar permaneciam na memória SRAM do microcontrolador.

Para transferir o conteúdo da variável auxiliar para o computador pessoal usando o MATLAB, optou-se por implementar um sistema de comunicação serial. No protocolo desenvolvido, uma palavra de controle deve ser enviada por esse *software* ao microcontrolador. Uma vez que essa palavra de controle é recebida, o microcontrolador responde, retornando o valor da frequência medida (variável auxiliar). A Figura 11 representa o fluxograma do comportamento da leitura do sensor turbina com o arduino.

Para realizar os ensaios apresentados neste trabalho, utilizou-se como atuador hidráulico um kit composto por inversor de frequência e motobomba trifásica. Por meio do servidor OPC, pode-se tanto enviar parâmetros para controlar esse kit quanto realizar a leitura dos parâmetros em uso pelo sistema. Esse detalhe é importante, pois permite

Figura 11 – Fluxograma de comunicação do arduino.

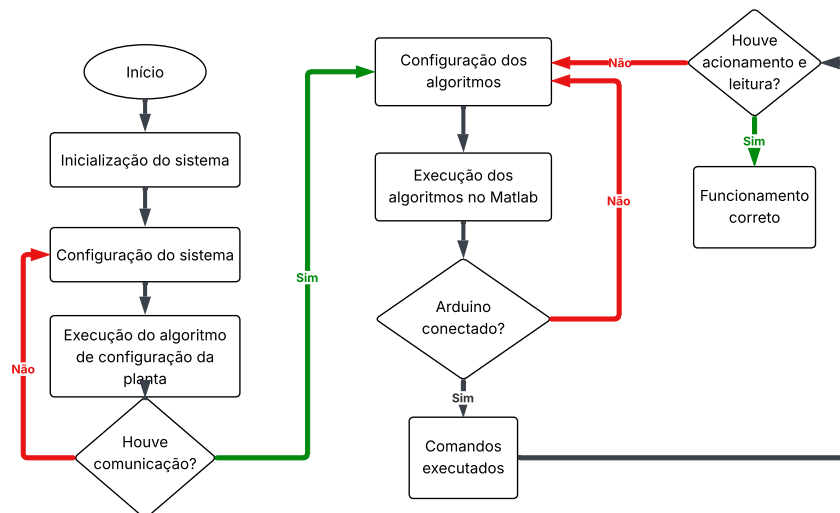


Fonte: Do autor.

ao usuário verificar se o valor previamente definido está, de fato, sendo empregado pelo sistema.

No MATLAB, uma estrutura de dados foi utilizada para armazenar tanto os parâmetros de controle desse kit (ajustados e implementados) quanto as informações enviadas pelos medidores presentes na planta piloto (vazão, nível). Além disso, essa estrutura também foi utilizada para armazenar a frequência de saída do medidor de vazão YF-S201. Por meio da Figura 12 é possível observar o fluxograma de inicialização e funcionamento do sistema visto do computador pessoal.

Figura 12 – Fluxograma de funcionamento da planta e do MATLAB.



Fonte: Do autor.

Para garantir um período de amostragem constante durante a realização dos ensaios, evitando problemas causados pela latência do sistema, optou-se por armazenar novos dados a cada 5 s. Dessa forma, ao longo deste trabalho, para que o intervalo de tempo entre dois pontos fosse de 1 s, utilizou-se interpolação linear.

3.2 Calibração estática do medidor de vazão

O sensor do tipo turbina utilizado para monitorar a vazão de saída do tanque de aquecimento foi calibrado utilizando-se como referência a vazão de entrada medida pelo sensor posicionado na entrada do mesmo tanque. Para isso, inicialmente ajustou-se um valor fixo de vazão de entrada, definindo-se um valor de referência para o inversor de frequência que controla a bomba trifásica.

Na sequência, o sistema foi inicializado e os valores de vazão de entrada, nível e frequência dos pulsos medidos foram adquiridos e armazenados em um computador. O tempo de duração dos ensaios foi previamente ajustado para 30 minutos, a fim de garantir a estabilidade do nível do tanque.

Em termos práticos, considerou-se que os valores das vazões de entrada e saída eram iguais a partir do instante de tempo em que o nível do tanque permanece constante. Sendo assim, relacionando os valores de vazão e frequência medidos a partir dos dois sensores, pode-se determinar uma curva de calibração.

Nesta etapa, foram utilizados cinco pontos de operação distintos, definidos em função da frequência de saída do inversor. Devido as características do sistema SMAR utilizado para controlar o inversor, a faixa de valores de frequência utilizada foi definida de forma percentual, com valores entre 35 % e 55 % da frequência nominal (60 Hz), em passos de 5 %. O limite superior foi ajustado empiricamente, visando evitar o transbordamento do tanque.

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos nesta etapa. Vale ressaltar que as cores utilizadas nos gráficos para representar os pontos de operação serão mantidas durante toda a etapa de calibração estática (azul para 35%, laranja para 40%, amarelo para 45%, roxo para 50% e verde para 55%).

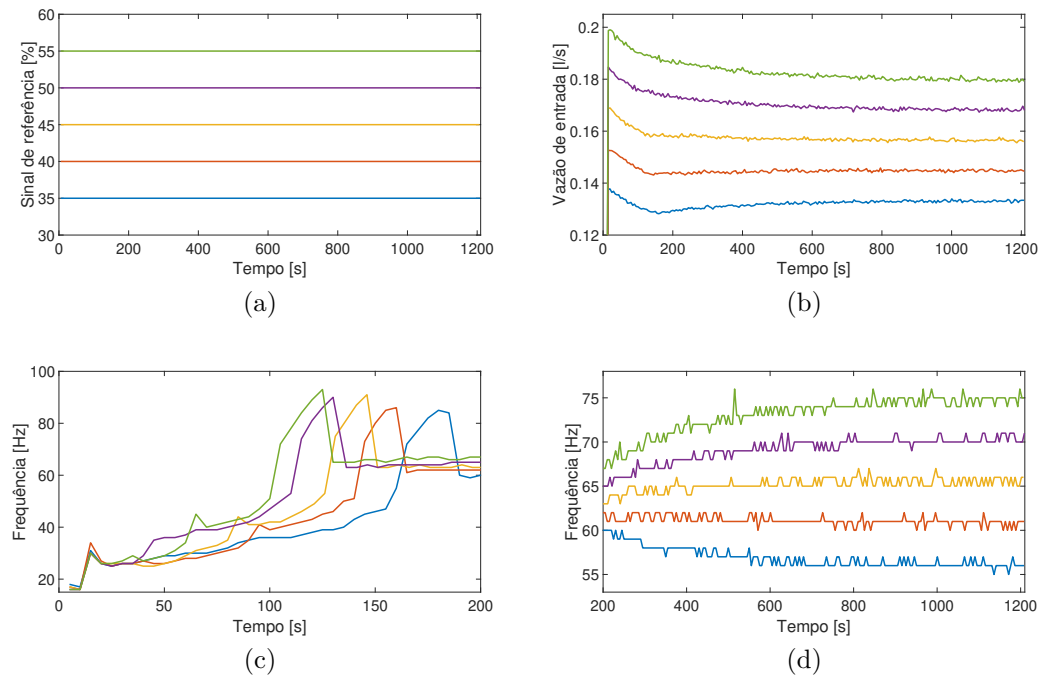
O resultado apresentado pela Figura 13(b) mostra um comportamento atípico nos primeiros 200 s, aproximadamente, de todas as curvas adquiridas. Essa região apresenta uma queda momentânea de vazão que, na sequência, atinge outro patamar e permanece em regime até o final do processo de aquisição.

Ao analisar o diagrama P&ID do sistema na Figura 2, observou-se que esse comportamento ocorre devido à ausência de uma válvula de retenção na tubulação de entrada dos tanques. Como resultado, a pressão exercida pela coluna d'água do tanque em questão provoca o retorno de parte do fluido até o reservatório por meio de um tubo de alívio presente na planta.

Para melhorar a apresentação dos resultados, foi necessário dividir o gráfico utilizado para representar os valores de frequência medidos considerando a saída do sensor YS-F201 em duas partes. A Figura 13(c) apresenta o comportamento transitório inicial, e a Figura 13(d) apresenta o comportamento do sistema em regime, após a estabilização do nível.

As Figuras 14 e 15 apresentam uma análise da dispersão dos valores medidos em

Figura 13 – Sinais adquiridos ao longo do processo de calibração estática do novo medidor de vazão de saída e obtidos no tanque de aquecimento. Em (a), sinais de referência utilizados para controlar inversor de frequências. Em (b), vazão de entrada medida. Figuras (c) e (d) apresentam valores de frequência de saída do medidor YF-S201 em regime transitório e permanente respectivamente.



Fonte: Do autor.

regime permanente do sensor de vazão nativo da planta, o FIT-31, e do sensor de vazão instalado na saída, o FT-31A, respectivamente (descartando os primeiros 200 s).

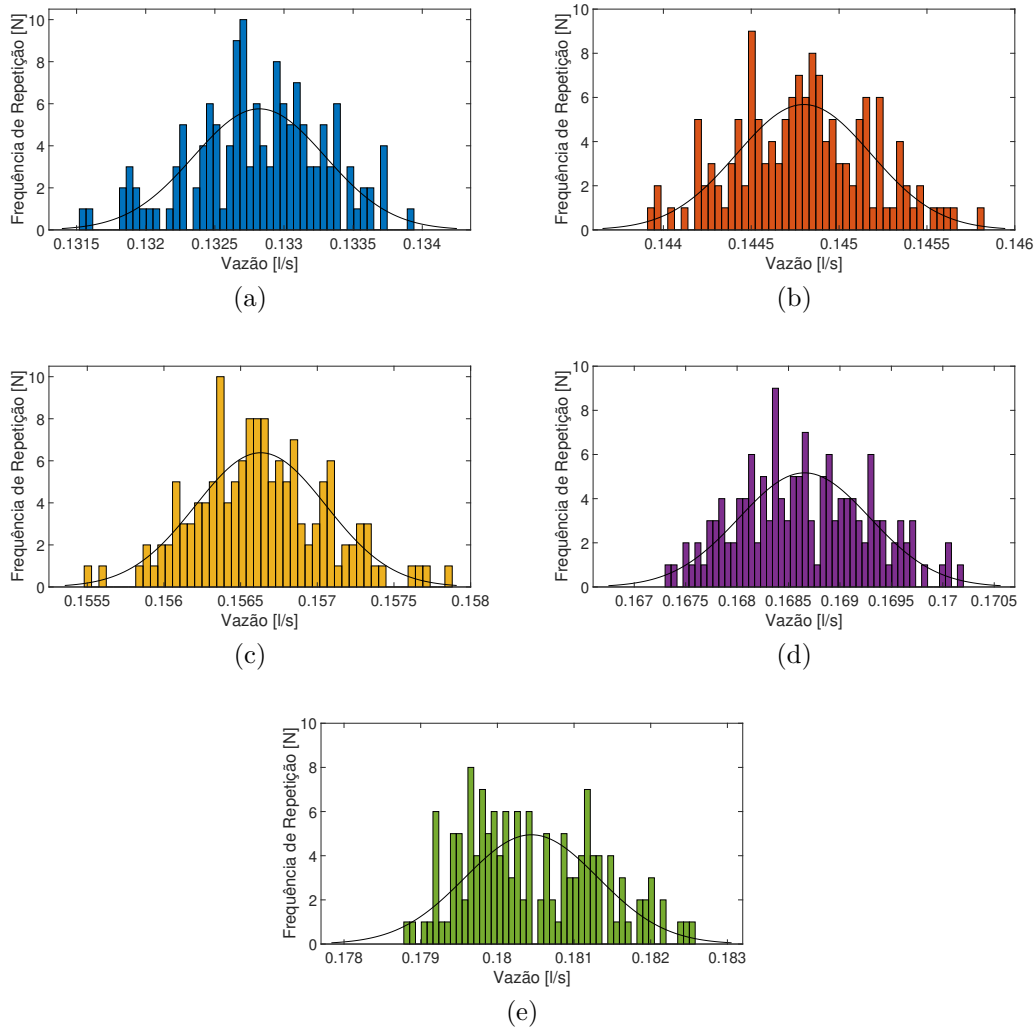
Ao analisar o resultado apresentado na Figura 14, nota-se que a dispersão dos valores medidos apresenta distribuição gaussiana. Além disso, observa-se que os valores de desvio obtidos em relação aos valores médios apresentaram variações máximas da ordem de 1%.

Os resultados apresentados na Figura 14 mostram que a maior limitação do medidor de vazão escolhido é a sua resolução que, segundo o fabricante, é de 450 pulsos por litro (SEA Electronic Components, s.d.). Como pode ser visto, os resultados concentram-se em faixas de frequência limitadas, resultado do baixo número de pulsos gerados pelo sensor no intervalo de tempo analisado (1 s).

A Tabela 2 resume os resultados apresentados graficamente, apresentando os valores das médias (μ) e desvios padrão (σ) para os valores de vazão e frequência medidos. Pode-se observar uma diferença significativa entre as ordens de grandeza dos desvios calculados a partir do medidor de vazão FIT-31 e do medidor de vazão FT-31A.

A Figura 16 apresenta um gráfico que relaciona todos os pontos utilizados para gerar os gráficos anteriores. A partir desse gráfico, pode-se relacionar valores de vazão, medidos por FIT-31, a valores de frequência, medidos por FT-31A. Pode-se observar que,

Figura 14 – Análise da dispersão dos valores de vazão de entrada (medidos por FIT-31).



Fonte: Do autor.

para todos os pontos de operação, há variações significativas nos valores dos parâmetros medidos.

Os valores médios dos pontos apresentados na Figura 16 foram utilizados para levantar experimentalmente uma curva de calibração. Nesta etapa, o *Curve Fitting toolbox* do *software* MATLAB foi usado para ajustar uma função linear adequada para representar o comportamento do sistema.

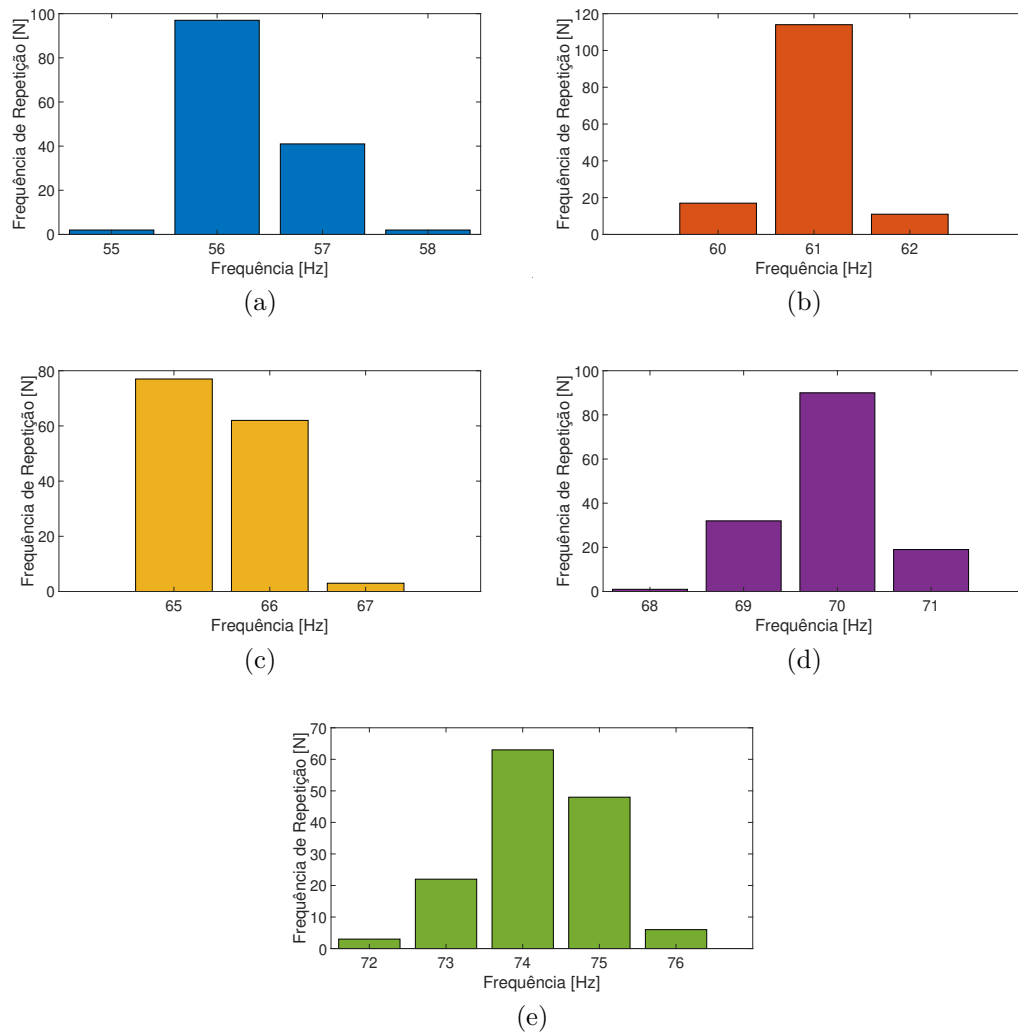
A curva de calibração obtida experimentalmente foi definida pela expressão

$$Q = 0,002393 \cdot f \quad (3.1)$$

sendo Q a vazão [l/s] e f a frequência [Hz]. Para o ajuste proposto, obteve-se um $R^2 = 0,9957$, com um resíduo de 0,00244.

De acordo com SEA Electronic Components (s.d.), a curva de calibração do sensor pode ser obtida por meio de uma aproximação linear, onde se considera o número de pulsos

Figura 15 – Análise da dispersão dos valores de frequência de saída (medidos por FT-31A).



Fonte: Do autor.

por litro medido pelo sensor em função do tempo. Dessa forma, sabendo-se que a resolução do sensor é de 450 pulsos por litro, pode-se relacionar a frequência medida e a vazão a partir da expressão

$$Q = \frac{1}{450} \cdot f = 0,00222 \cdot f. \quad (3.2)$$

Segundo o fabricante, as incertezas associadas a esse ajuste são inferiores a 5 %.

A Tabela 3 apresenta o conjunto de dados utilizado pelo fabricante na etapa de calibração do medidor de vazão.

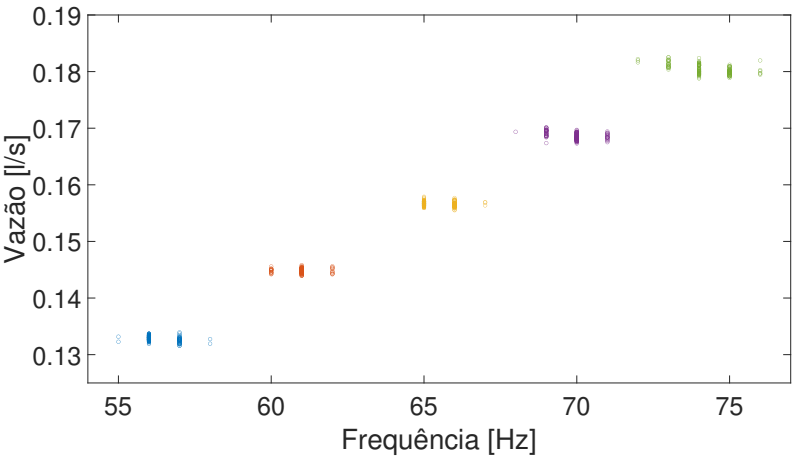
Durante a etapa de revisão bibliográfica realizada neste trabalho, foram encontradas diferentes versões de *datasheets* para o mesmo modelo de sensor. Observa-se uma diferença significativa entre os valores dos coeficientes das curvas de calibração obtida experimentalmente e fornecida pelo fabricante. Essas diferenças podem estar relacionadas

Tabela 2 – Comparação entre valores médios e desvios padrão, obtidos durante o processo de calibração do medidor de vazão YF-S201.

Ponto de operação [%]	Vazão [l/s]		Frequência [Hz]	
	μ	σ	μ	σ
35	0,1328	0,00047	56,30	0,5190
40	0,1448	0,00038	60,96	0,4436
45	0,1566	0,00043	65,48	0,5421
50	0,1686	0,00063	69,89	0,6155
55	0,1804	0,00087	74,22	0,8370

Fonte: Do autor.

Figura 16 – Relação entre vazão de entrada e frequência de saída obtidos a partir do ensaio de calibração estático. Foram utilizados pontos de operação entre 35 % e 55 %.



Fonte: Do autor.

Tabela 3 – Conjunto de dados de calibração fornecido pelo fabricante do medidor de vazão YF-S201.

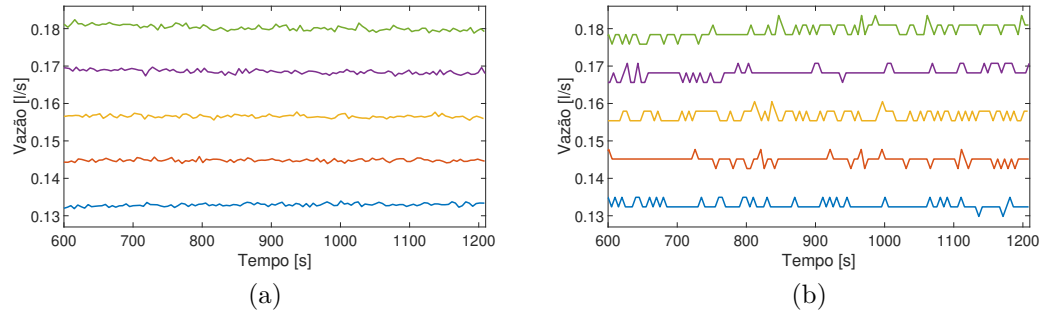
Vazão [l/h]	Frequência [Hz]
120	16
240	32,5
360	49,3
480	65,5
600	82
720	90,2

Fonte: Retirado de SEA Electronic Components (s.d.).

a aspectos físicos do sistema utilizado na planta piloto, composto por uma série de curvas e restrições que podem contribuir de forma significativa para perdas de carga.

A curva de calibração obtida experimentalmente foi utilizada como referência para estimar a vazão de saída do tanque a partir de valores de frequência medidos. Inicialmente, esse teste considerou os mesmos sinais utilizados para encontrar a curva de calibração utilizada. Os resultados são apresentados na Figura 17.

Figura 17 – Comparação entre valores de vazão de entrada medidos a partir de FIT-31 (a) e valores de vazão de saída estimada a partir dos valores de frequência medidos a partir de FT-31A (b).



Fonte: Do autor.

Observa-se que os resultados estimados apresentaram valores próximos aos valores medidos pelo sensor de referência, com desvios máximos inferiores a 5%. Esses resultados comprovam que a curva de calibração obtida apresenta um ajuste adequado, ainda que haja diferenças em relação à curva definida pelo fabricante.

3.3 Caracterização dinâmica do sistema de medição

Ensaio de validação dinâmicos foram realizados para avaliar o desempenho da curva de calibração obtida experimentalmente. Esses ensaios também tem como objetivo avaliar o comportamento dinâmico do medidor YF-S201, especialmente quanto ao tempo de resposta e faixas de operação.

Para realizar esse procedimento, sinais de referência senoidais gerados no MATLAB foram aplicados à entrada de controle do inversor de frequência. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados para gerar os sinais senoidais aplicados ao sistema.

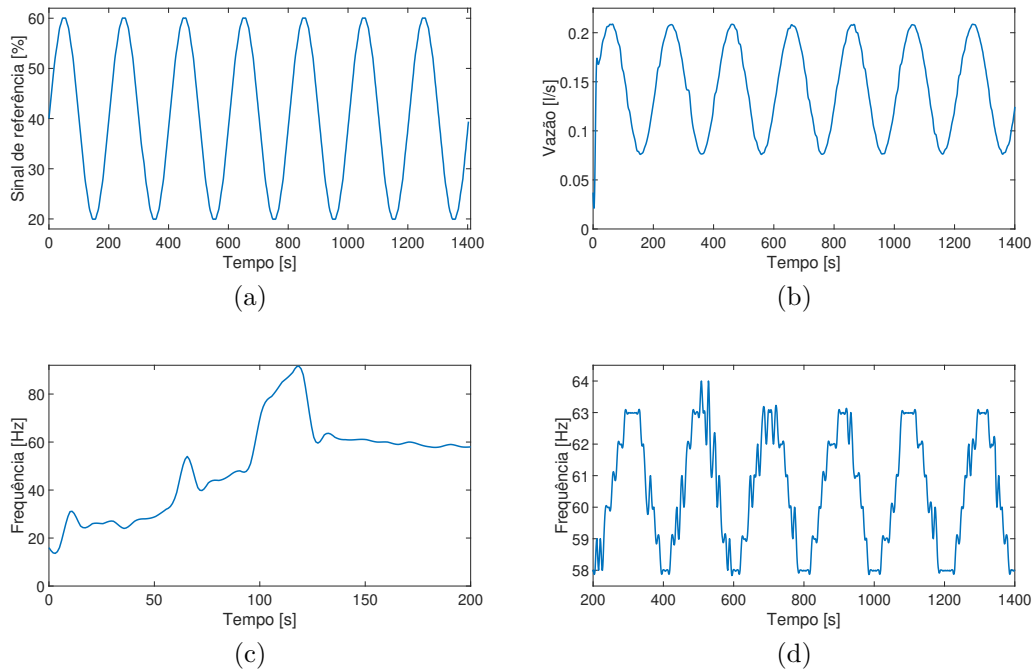
Tabela 4 – Parâmetros para geração dos sinais senoidais usados como referência nos ensaios de validação dinâmicos.

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Valor médio	40%	45%	50%
Amplitude mínima	20%	20%	20%
Amplitude máxima	60%	70%	80%
Nº de pontos por período	40	40	40
Nº de ciclos de senoide	7	7	7

Fonte: Do autor.

Os parâmetros apresentados na Tabela 4 foram definidos de forma empírica. Para isso, foram definidos os seguintes critérios: o nível do tanque não poderia saturar em regime permanente, o período dos sinais deveria ser maior do que a constante de tempo

Figura 18 – Resultado da análise considerando parâmetros do ensaio 1. Em (a), sinal de referência utilizado. Em (b), vazão medida por FIT-31. Valores de frequência medidos por FT-31A são apresentados em (c) e (d).



Fonte: Do autor.

do sistema e a duração do ensaio não deveria exceder 30 min. Além disso, optou-se por ajustar os valores médios e as amplitudes dos sinais de modo a garantir uma variação no nível do tanque, considerando três faixas de operação distintas: inferior (abaixo de 50 %), central (em torno de 50 %) e superior (acima de 50 %).

A Figura 18 apresenta os resultados obtidos utilizando como referência os sinais definidos para o ensaio 1. Assim como nos casos anteriores, ao representar os valores de frequência medidos usando o sensor YF-S201, foi necessário separar o trecho transitório do trecho em regime permanente.

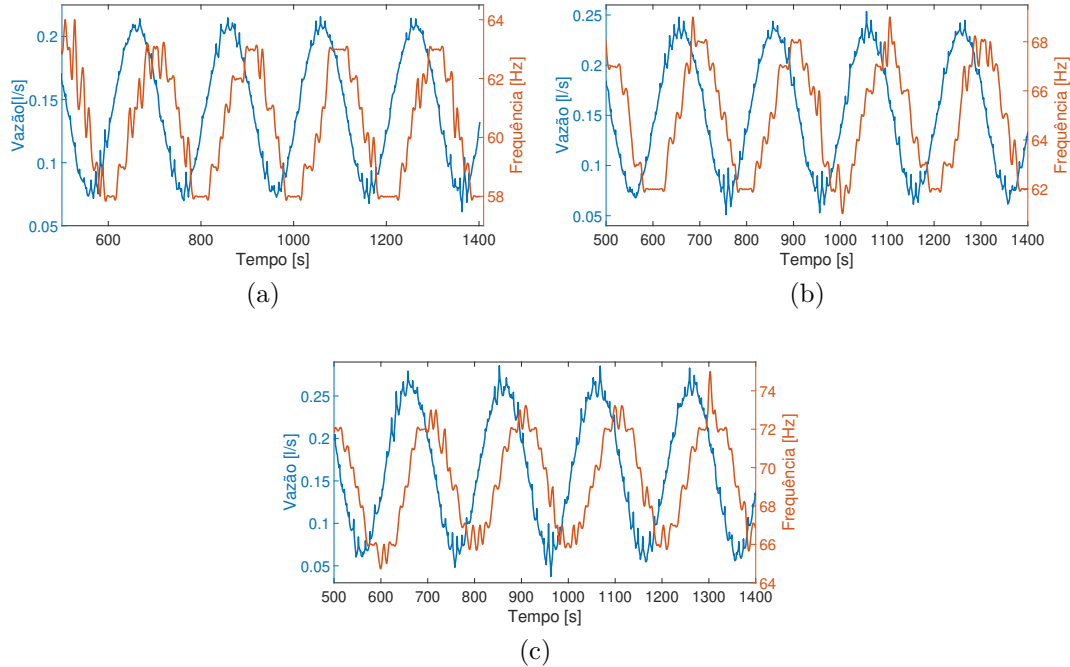
Pode-se observar a presença de um transitório inicial nas medições de vazão e frequência. Entretanto, enquanto o regime transitório apresentado pelo medidor de vazão FIT-31 tem duração aproximada de 5 s, observa-se um regime transitório com duração aproximada de 200 s para os sinais obtidos a partir do medidor de vazão YF-S201.

Conforme mencionado anteriormente, vários fatores mecânicos contribuem para o aumento desse regime transitório, tais como o fluxo de ar pela tubulação, o retorno de líquido pela tubulação de alívio e as perdas de carga associadas ao sistema hidráulico.

Um comportamento semelhante foi observado ao analisar os resultados dos ensaios 2 e 3. A Figura 19 apresenta uma comparação entre os valores de vazão de entrada, medidos a partir do FIT-31, e os valores de frequência de saída, medidos usando FT-31A, para os três ensaios propostos. Nos gráficos, as escalas de tempo e amplitude foram

ajustadas para facilitar a visualização das informações.

Figura 19 – Comparação entre valores de vazão (obtidos a partir de FIT-31) e frequência (medidos usando FT-31A) para os ensaios 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



Fonte: Do autor.

A análise dos gráficos mostra que há uma defasagem significativa entre os sinais de entrada (vazão) e saída (frequência). Além disso, observa-se claramente o efeito da baixa resolução do sistema de medição de vazão do tipo turbina, que apresenta uma baixa variação (± 20 Hz) para as faixas de operação (0,05 l/s a 0,25 l/s) consideradas neste trabalho.

O tempo de atraso entre os sinais foi estimado por meio do cálculo da correlação cruzada entre os sinais. Como resultado, foram obtidos atrasos de 50 s para o ensaio 1, 49 s para o ensaio 2, e 42 s para o ensaio 3. Essas variações dos tempos de atraso em função dos pontos de operação escolhidos são causadas pela dinâmica do fluido armazenado no tanque e estão relacionadas ao acúmulo de líquido no reservatório em função do tempo.

Como mencionado anteriormente, neste trabalho foram realizadas medições considerando intervalos de tempo de 5 s, e um fator de interpolação linear foi utilizado para ajustar o período de amostragem para 1 s. Esse ajuste pode ter contribuído para uma pequena defasagem, com valor inferior a 5 s.

Pode-se compensar os efeitos desse atraso por *software*, desde que esses valores sejam bem definidos. Entretanto, essa correção torna-se mais complexa quando há variações significativas nos tempos de atraso em função dos pontos de operação utilizados, tornando mais complexo o processo de calibração de sensores com essas características a partir de ensaios dinâmicos.

3.4 Considerações parciais

Neste Capítulo, foram apresentadas as etapas de configuração da planta piloto SMAR PD3-F, destacando o procedimento usado para controlar os instrumentos de medição e os atuadores presentes na planta de forma remota, por meio do *software* MATLAB e do *OPC Toolbox*. Além disso, foram descritos os procedimentos usados para parametrizar o inversor de frequência, responsável pelo controle da motobomba trifásica.

Nas sequências, o sensor de vazão YF-S201 foi apresentado, destacando-se o procedimento de instalação e configuração adotados ao longo do trabalho. Foram realizados procedimentos de calibração estáticos, e os resultados obtidos foram comparados a valores de referência fornecidos pelo fabricante. Como resultado, considerando-se a condição de regime permanente, obteve-se um erro inferior a 5 % nas medições de vazão de saída do tanque.

Foram realizados ensaios dinâmicos, buscando caracterizar o comportamento do sistema de medição do tipo turbina quando submetido a variações de vazão controladas em função do tempo. Nessa etapa, foram observados os efeitos da limitação da resolução do sistema de medição, cuja variação máxima foi da ordem de 20 Hz. Finalmente, destaca-se que foram observados atrasos significativos nos tempos de resposta do sensor, que variaram entre 42 s e 50 s a depender do ponto de operação escolhido.

4 Medição indireta do nível de tanques a partir da vazão

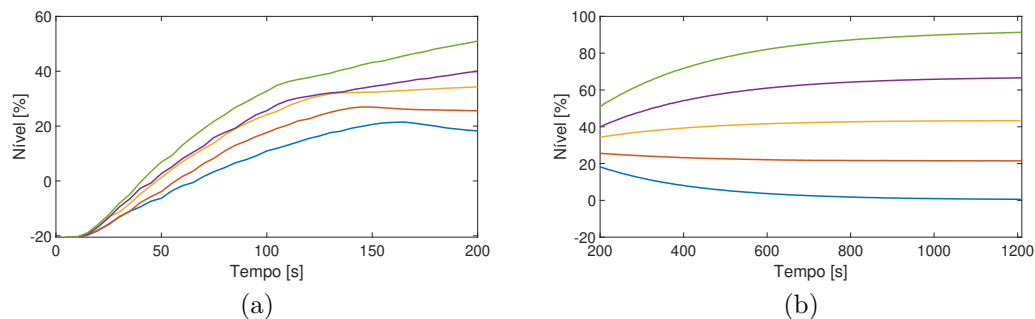
Este capítulo apresenta duas técnicas que podem ser utilizadas para medir, indiretamente, o nível de tanques fechados, usando como referência o balanço de massas e a vazão de saída. Na primeira abordagem, considera-se que o sistema possui medidores de vazão na entrada e na saída do tanque, e que o volume acumulado em função do tempo pode ser convertido em um valor proporcional de altura. Na segunda abordagem, relaciona-se diretamente a vazão de saída medida pelo medidor instalado no sistema à altura da coluna de líquido no interior do tanque. São apresentados os principais resultados obtidos, destacando-se os valores de erros percentuais para cada caso.

4.1 Método do balanço de massas

Para avaliar a eficiência do método de balanço de massas, foram utilizados os mesmos sinais adquiridos na etapa de calibração estática do medidor de vazão. Assim como no caso anterior, a faixa de valores de frequência utilizada foi definida percentualmente, com valores entre 35 % e 55 % da frequência nominal (60 Hz), em passos de 5 %.

Os resultados das medições de nível obtidas a partir do medidor de pressão diferencial LIT-31 são apresentados na Figura 20. O mesmo padrão de cores adotado no Capítulo anterior foi mantido neste Capítulo (azul para 35%, laranja para 40%, amarelo para 45%, roxo para 50% e verde para 55%).

Figura 20 – Gráficos de nível em função do tempo, obtidos a partir de LIT-31. Figura (a) apresenta período transitório e Figura (b), regime permanente.



Fonte: Do autor.

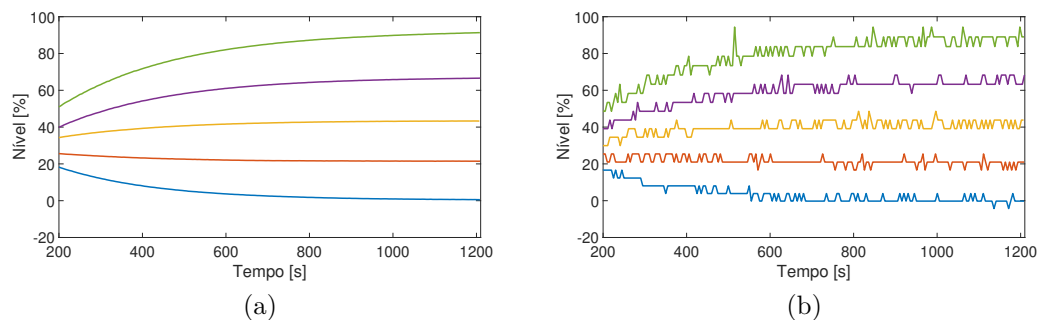
Ao analisar a Figura 20(a), nota-se que os efeitos transitórios observados anteriormente nos gráficos de vazão em função do tempo também estão presentes nas curvas de nível em função do tempo.

É necessário ressaltar que, devido à posição de instalação do sensor LIT-31, há uma pequena região localizada na parte inferior do tanque, representada nos gráficos com valores negativos. Essa configuração visa garantir um nível mínimo de líquido no tanque, a fim de minimizar efeitos transitórios, como os apresentados neste trabalho.

Para implementar o método do balanço de massas, inicialmente foi necessário converter os valores de frequência medidos pelo FT-31A em vazão. Para isso, utilizou-se a curva de calibração descrita pela Equação 3.1 obtida experimentalmente no Capítulo anterior. Em seguida, foram relacionados os valores de vazão de entrada, medidos a partir do FIT-31, e a vazão de saída estimada. A diferença entre os valores de entrada e saída foi acumulada em função do tempo.

Para converter o volume acumulado em um valor percentual de nível, assumiu-se que o volume total do tanque de aquecimento é de aproximadamente 20 l. A Figura 21 apresenta um gráfico comparativo entre o nível medido a partir do sensor LIT-31 e o nível estimado pelo método do balanço de massas.

Figura 21 – Comparação entre valores de nível medidos por LIT-31 (a) e estimados a partir do método de balanço de massas (b).



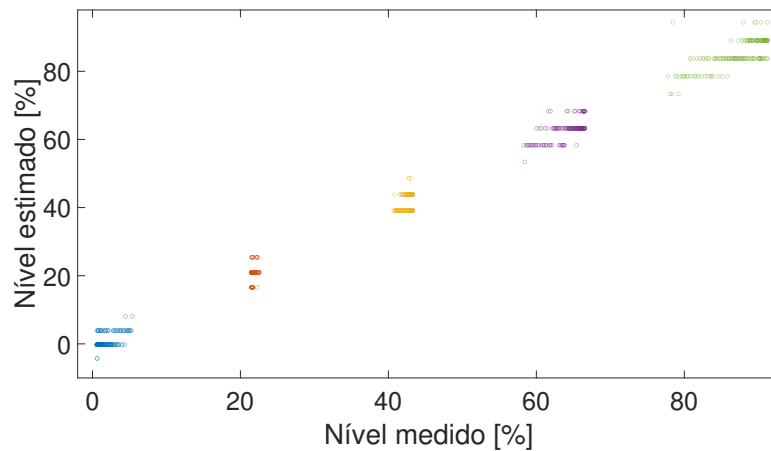
Fonte: Do autor.

Ao analisar os resultados, pode-se observar um ruído nas curvas obtidas a partir do método do balanço de massas. Esse efeito é resultado da baixa resolução do medidor de vazão YF-S201, que se propaga quando se calcula a vazão de saída do tanque.

Além disso, nota-se uma diferença entre os valores finais obtidos a partir de LIT-31 quando comparados aos obtidos a partir do método proposto. Essa diferença pode estar relacionada ao efeito transitório inicial do sistema, que, para esse tipo de abordagem, não pode ser desconsiderado.

A Figura 22 apresenta um gráfico comparativo entre valores medidos e estimados de nível, considerando a metodologia proposta neste trabalho. Ao analisá-la, observa-se a presença de uma grande dispersão dos pontos em torno dos valores médios, com valores percentuais superiores aos valores máximos de tolerância propostos por este trabalho (5 %).

Figura 22 – Relação entre nível medido por LIT-31 (eixo x) e nível estimado por meio do método do balanço de massas (eixo y).



Fonte: Do autor.

4.2 Calibração dinâmica do sistema

Nesta abordagem, foram aplicados os conceitos teóricos descritos no Capítulo 2, seção 2.6.2, em que se apresenta um modelo matemático que pode ser utilizado para relacionar o nível e a vazão de saída em um tanque pressurizado.

Para realizar o procedimento de calibração dinâmica do sistema, foram definidos dois valores de referência para controle do inversor de frequência: 0 % (valor mínimo) e 85 % (valor máximo). Ressalta-se que, como mencionado no Capítulo anterior, o inversor de frequência foi parametrizado, considerando-se 0 % para 15 Hz e 100 % para 60 Hz.

O valor mínimo do sinal de referência do inversor foi ajustado para garantir um nível mínimo no tanque de aquecimento próximo de 0 %. O valor máximo do sinal de referência pode ser definido de forma arbitrária, mas deve ser alto o suficiente para garantir que o tanque em análise seja completamente preenchido. Pode-se controlar o tempo necessário para encher o tanque a partir do ajuste do valor máximo do sinal de referência aplicado ao inversor.

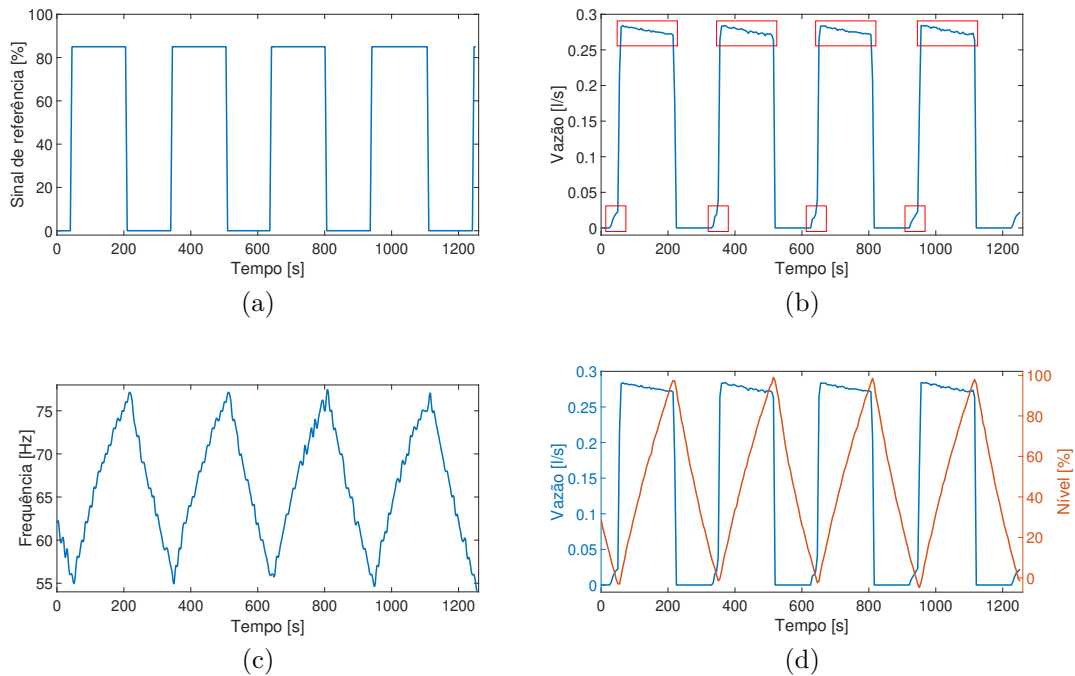
Antes do início do processo de calibração, o sistema foi energizado e o inversor de frequência foi ajustado com o valor de referência mínimo por 5 min, garantindo, assim, a estabilidade do nível mínimo do tanque. Em seguida, implementou-se um algoritmo em MATLAB para controlar o nível do tanque numa faixa de operação, definida entre 2,5 % e 95 %. Para isso, o medidor de nível LIT-31 instalado na planta foi usado como referência.

O algoritmo implementado possui uma etapa de verificação preliminar, cujo objetivo é garantir que o nível inicial do tanque seja menor do que o limite inferior definido para o ensaio (2,5 %). Uma vez que essa condição é atendida, define-se um *flag* de controle em nível alto, indicando que o tanque está vazio e a motobomba deve ser acionada. Nessa condição, ajusta-se o inversor de frequência com o valor de referência máximo (85 %).

Em seguida, o algoritmo verifica se o nível máximo definido para o tanque (95 %) foi alcançado. Se essa condição for verdadeira, o *flag* de controle é zerado e o algoritmo ajusta o inversor de frequência com o valor de referência mínimo (0 %), e o tanque passa a ser esvaziado. A partir desse momento, o algoritmo passa a verificar se o nível do tanque é menor do que 2,5 %. Quando essa condição é verdadeira, o procedimento é reiniciado.

Foram adquiridos os sinais de referência do inversor de frequência, a vazão de entrada medida pelo FIT-31, o nível medido pelo LIT-31 e a frequência do medidor de vazão de saída FT-31A. A Figura 23 apresenta os resultados obtidos nesta etapa.

Figura 23 – Ensaio 1: sinal de referência utilizado para controle do inversor de frequência (a), vazão medida por FIT-31 (b), frequência medida por FT-31A (c) e relação entre valores de vazão e nível medidos por FIT-31 e LIT-31 (d).



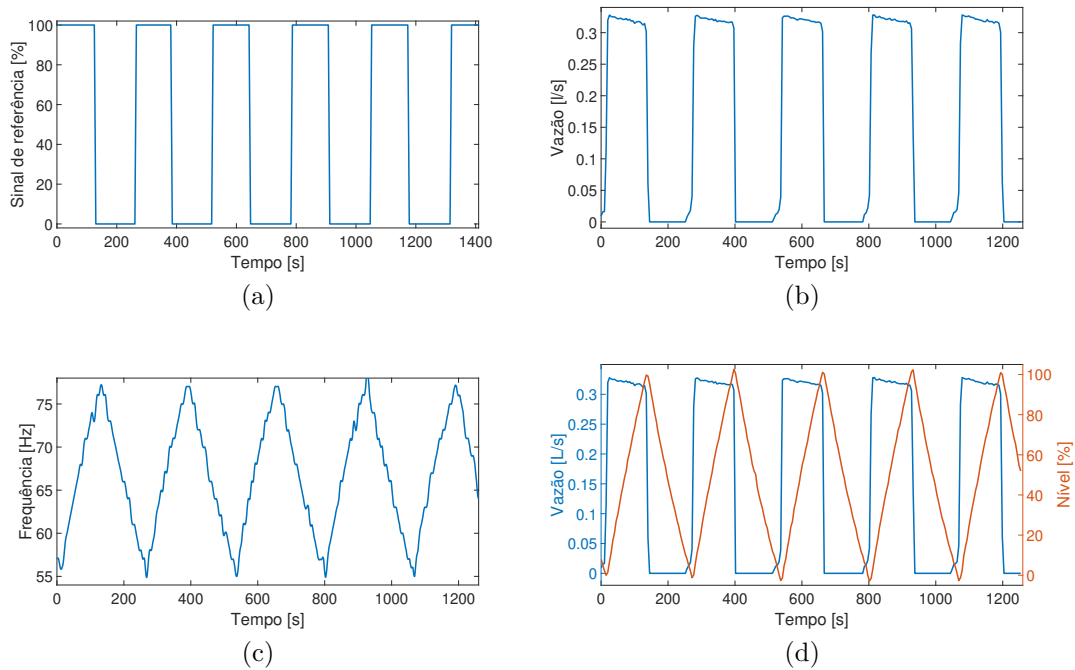
Fonte: Do autor.

Na Figura 23(b), retângulos em vermelho foram usados para destacar dois problemas observados nesta etapa. Na parte inferior do gráfico, nota-se que a vazão nominal de entrada do tanque não acompanha o comportamento do sinal de referência aplicado ao inversor. Esse efeito foi discutido no Capítulo anterior, onde trechos transitórios foram destacados. Na parte superior do gráfico, observa-se uma redução dos valores máximos de vazão a medida que o nível do tanque aumenta. Esse efeito está relacionado ao aumento da pressão exercida pela coluna d'água.

Como comentado anteriormente, pode-se controlar o tempo necessário para o tanque atingir seu nível máximo a partir do ajuste do sinal de referência aplicado ao inversor de frequência. Entretanto, como observado na Figura 23, não é possível controlar o tempo de esvaziamento do tanque sem alterar a configuração do circuito hidráulico.

Após essa análise, realizou-se um segundo ensaio, definindo-se um valor máximo de 100 % como valor de referência para o controle do inversor de frequência. O valor mínimo e as condições de teste não foram modificados. O resultado obtido é apresentado na Figura 24. Nota-se que o tempo necessário para encher o tanque é menor, uma vez que a vazão de entrada ajustada pela motobomba é maior; contudo, observa-se que a resposta dinâmica do sistema é semelhante à observada no ensaio 1.

Figura 24 – Ensaio 2: sinal de referência utilizado para controle do inversor de frequência (a), vazão medida por FIT-31 (b), frequência medida por FT-31A (c) e relação entre valores de vazão e nível medidos por FIT-31 e LIT-31 (d).



Fonte: Do autor.

A Figura 25 apresenta um gráfico comparativo entre o nível medido por LIT-31 e a frequência medida por FT-31A. Como mencionado no Capítulo anterior, por se tratar de um medidor de vazão do tipo turbina, há uma relação direta entre frequência e vazão.

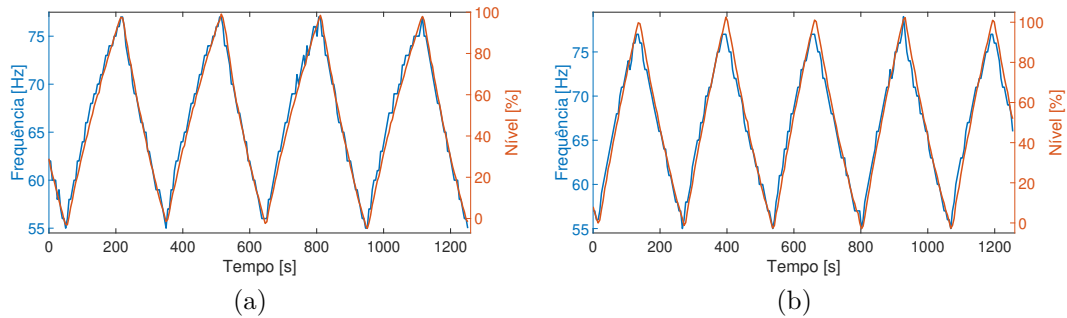
Os resultados evidenciam uma forte correlação entre os dois sinais, confirmando a análise matemática apresentada no Capítulo 2. Nota-se que existe uma pequena defasagem entre as curvas, mas os valores medidos foram inferiores ao período de amostragem definido para os ensaios (5 s).

Os sinais apresentados na Figura 25 foram utilizados para levantar duas curvas de calibração, relacionando o nível em função da frequência. A ferramenta MATLAB *Curve Fitting* foi usada para ajustar os parâmetros dessas curvas.

Para isso, considerou-se um modelo matemático representado por

$$L(f) = \alpha \cdot f^2 + c, \quad (4.1)$$

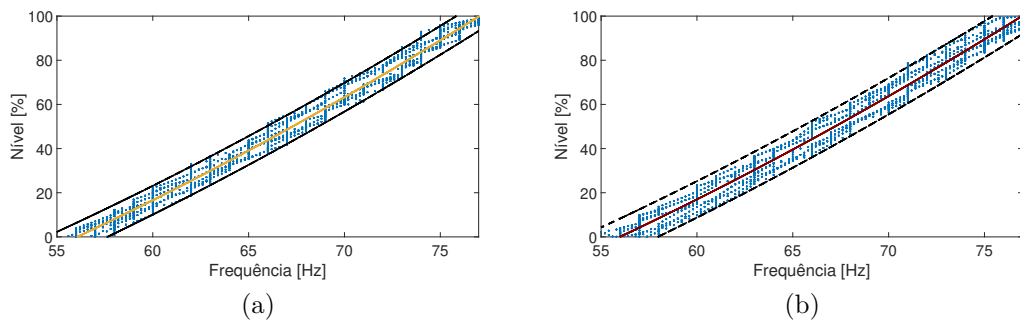
Figura 25 – Comparação entre valores de frequência, medidos por FT-31A, e nível, medidos por LIT-31. A Figura (a) apresenta resultado do ensaio 1, e a Figura (b) apresenta resultado do ensaio 2.



Fonte: Do autor.

sendo $L(f)$ o nível estimado em função da frequência [%], f a frequência instantânea [Hz] e c um parâmetro constante. A Figura 26 apresenta os gráficos das curvas de calibração obtidas a partir da correlação entre o nível do fluido e a frequência de saída do sensor do tipo turbina instalado, considerando a repetição do sinal nos ensaios realizados. Em preto, foram traçadas barras de erro, que definem uma tolerância de $\pm 5\%$ para o ajuste.

Figura 26 – Curvas de calibração obtidas a partir dos ensaios 1 (a) e 2 (b). Em preto, barras de erro usadas para definir uma tolerância de $\pm 5\%$.



Fonte: Do autor.

A Tabela 5 apresenta os valores dos coeficientes obtidos a partir do ajuste, considerando ambos os ensaios realizados.

Tabela 5 – Parâmetros ajustados para as curvas de calibração, considerando os ensaios 1 e 2. São apresentados valores de R^2 e norma do resíduo para cada caso.

Ensaio	α	c	R^2	Resíduo
1	0,03582	-112,4	0,9886	115,13
2	0,03585	-112,1	0,9827	145,52

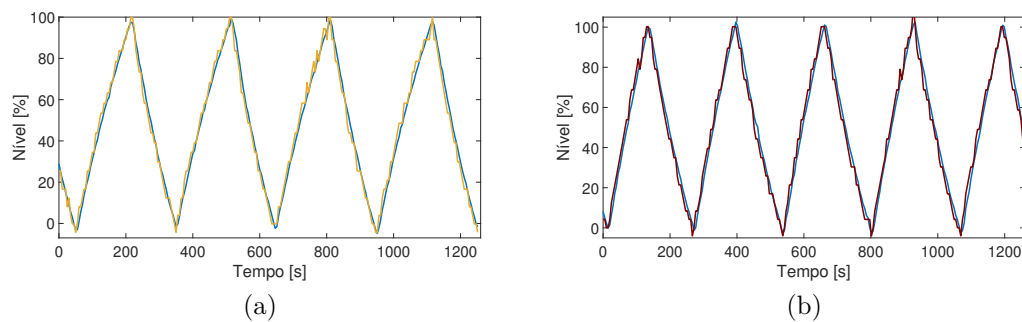
Fonte: Do autor.

Observa-se que os parâmetros obtidos a partir dos dois ensaios são semelhantes,

o que indica que qualquer uma das curvas de calibração pode ser aplicada aos diferentes cenários. Entretanto, a norma dos resíduos apresenta um valor mais alto do que o apresentado nas etapas de calibração do sistema para medição de vazão. Essa diferença pode estar relacionada ao modelo de ajuste escolhido, que, por simplicidade, agrupa as perdas em um único fator.

Num teste preliminar, os sinais de frequência medidos pelo FT-31A foram utilizados como parâmetros de entrada da curva de calibração obtida, e o nível do tanque foi estimado. Em seguida, os valores de nível estimados foram comparados aos valores medidos pelo LIT-31. A Figura 27 apresenta os resultados obtidos.

Figura 27 – Comparação entre valores de nível medidos por LIT-31 (em azul) e estimados a partir de valores de frequência medidos por FT-31A para os ensaios 1 (a) (em amarelo) e 2 (b) (em vermelho).



Fonte: Do autor.

Os resultados mostram que o nível estimado apresenta valores próximos aos medidos por LIT-31. Entretanto, nota-se que os efeitos da baixa resolução do medidor de vazão YF-S201 afetam diretamente a resolução do sistema de medição proposto neste trabalho.

Para validar a curva de calibração, foram utilizados os mesmos sinais senoidais apresentados no Capítulo 3, cujos parâmetros foram apresentados na Tabela 4. Para melhorar a visualização dos sinais, o período transitório inicial foi removido, e o tamanho das janelas foi ajustado para mostrar um número limitado de ciclos de senoide.

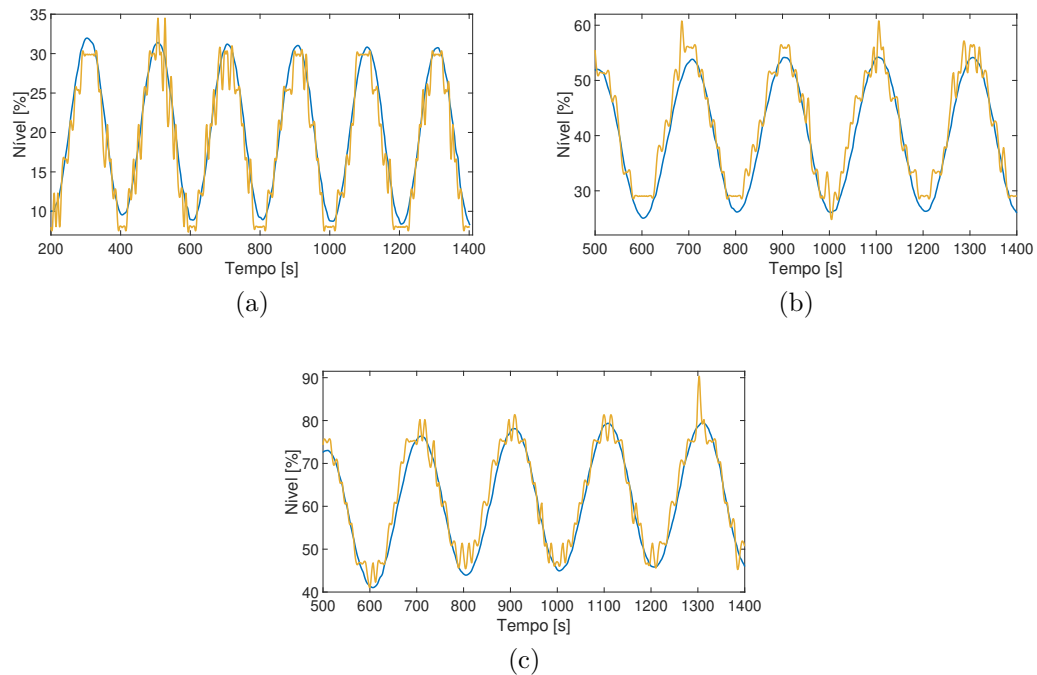
A Figura 28 apresenta uma comparação entre os valores medidos por LIT-31 e os estimados a partir da medição de frequência realizada usando FT-31A.

Os resultados mostram que os valores de nível estimados acompanham as variações medidas pelo sensor de referência, entretanto, pode-se observar que a baixa resolução do medidor de vazão YF-S201 limita a resolução do nível estimado, inserindo um ruído de quantização nas medições.

Os valores instantâneos de nível medidos e estimados foram utilizados para calcular o erro percentual instantâneo para cada ensaio. A Figura 29 apresenta os resultados obtidos.

Observa-se que, para os três ensaios, o erro instantâneo calculado apresenta uma

Figura 28 – Resultado da análise comparativa entre valores de nível medidos por LIT-31 (em azul) e valores estimados (em amarelo). Figuras (a), (b) e (c) apresentam resultados dos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.



Fonte: Do autor.

variação em torno de um valor médio diferente de zero. Essa média indica um erro sistemático, que poderia ser corrigido.

Para caracterizar a parcela aleatória do erro instantâneo, os resultados apresentados na Figura 29 foram analisados na forma de histograma. A Figura 30 apresenta os resultados dessa análise.

Pode se observar que, para os três ensaios, a variação dos valores de erro instantâneo calculados apresenta um comportamento que pode ser representado por meio de uma distribuição com envoltória gaussiana.

A Tabela 6 apresenta uma síntese dos resultados obtidos ao avaliar o comportamento do erro instantâneo para cada ensaio.

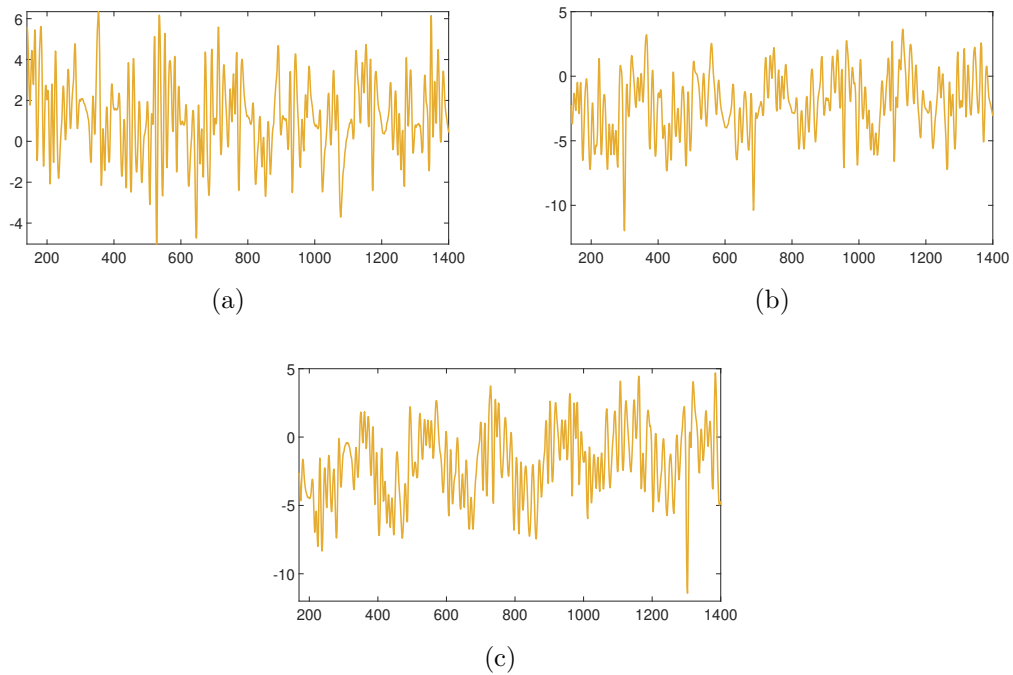
Tabela 6 – Parâmetros obtidos ao longo da análise do comportamento do erro instantâneo calculado considerando os ensaios com sinais senoidais.

Ensaio	μ [%]	σ [%]
Senoide 1	1,16	1,94
Senoide 2	-2,16	2,36
Senoide 3	-1,90	2,61

Fonte: Do autor.

Os resultados demonstram que, apesar dos problemas causados pela baixa resolução do sistema de medição de vazão nos testes realizados, o sistema apresentou valores

Figura 29 – Análise dos erros instantâneos em função do tempo. Figuras (a), (b) e (c) apresentam resultados dos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.



Fonte: Do autor.

de desvio padrão abaixo do limite definido inicialmente como objetivo para este trabalho (5 %).

Observa-se um aumento dos valores de desvio em função da quantidade de água presente no tanque, mas a variação apresentada foi inferior a 1 %.

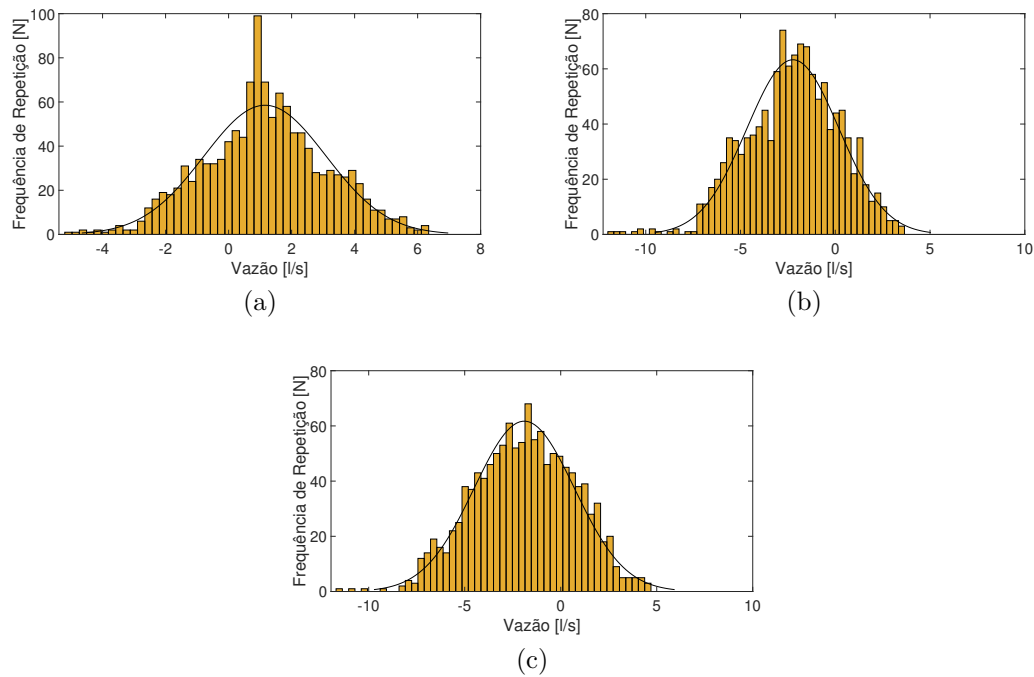
4.3 Considerações parciais

Este Capítulo apresentou uma análise de duas técnicas que podem ser empregadas em aplicações que envolvem a medição indireta do nível de tanques industriais: o método do balanço de massas e a relação direta entre a vazão de saída e o nível em tanques pressurizados.

A análise do método baseado no balanço de massas mostra que a principal limitação do método está relacionada ao início do processo, quando se observam efeitos transitórios no sistema hidráulico da planta piloto. Isso ocorre, pois a técnica exige que o volume acumulado em função do tempo seja determinado e, para isso, é necessário quantificar as diferenças instantâneas entre as vazões de entrada e saída do tanque, desde o instante em que a motobomba é acionada.

Para contornar esse problema, uma alternativa seria garantir uma vazão de entrada mínima suficientemente alta para evitar a ocorrência desses transitórios. Isso manteria um valor maior do que zero como nível mínimo do tanque, mas evitaria que os efeitos

Figura 30 – Representação dos erros instantâneos em forma de histogramas. Figuras (a), (b) e (c) apresentam resultados dos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.



Fonte: Do autor.

transitórios fossem acumulados na análise de regime permanente.

Os resultados obtidos a partir da relação direta entre a vazão de saída, representada pela frequência medida usando FT-31A, e o nível apresentaram resultados promissores. Nos testes usando sinais de referência senoidais, foram obtidos desvios abaixo de 3 %, permanecendo abaixo dos 5 % definidos como tolerância limite para este trabalho. Além disso, observou-se que as variações apresentam um comportamento gaussiano, característico de erros de medição aleatórios. Os resultados também mostraram a presença de erros sistemáticos, representados por valores médios diferentes de zero, que podem ser compensados a partir de um ajuste.

Finalmente, é importante destacar que parte das limitações dos métodos analisados foi provocada pela baixa resolução do sensor escolhido para o desenvolvimento deste trabalho, limitada a 450 pulsos por litro. A substituição desse sensor por uma versão com maior resolução poderia melhorar significativamente os resultados apresentados neste trabalho.

5 Considerações finais

Este trabalho apresentou uma análise experimental de métodos de medição indiretos aplicados à medição de nível de tanques industriais. A planta piloto Smar PD3-F foi utilizada como plataforma para o desenvolvimento dos ensaios, e o *software* Matlab foi empregado para monitorar e controlar, por meio de um servidor OPC, os sensores e atuadores presentes na planta.

O medidor de vazão do tipo turbina YF-S201 foi instalado na saída do tanque de aquecimento da planta e, num primeiro momento, foram realizados ensaios para definir uma curva de calibração de vazão para este medidor.

Os resultados obtidos na calibração estática do sensor indicaram um erro de medição inferior a 5 % em regime permanente, validando o dispositivo para operações em condições de fluxo constante. Entretanto, os ensaios dinâmicos revelaram restrições intrínsecas ao *hardware*, especificamente uma resolução limitada a 450 pulsos por litro.

Em relação às técnicas de medição indireta de nível, o método do balanço de massas demonstrou limitações práticas decorrentes dos efeitos transitórios no sistema hidráulico. A necessidade de se determinar o volume acumulado de líquido no tanque, a partir do instante em que a motobomba é acionada, faz com que as oscilações iniciais de fluxo sejam integradas ao longo do tempo, gerando erros cumulativos. A análise indicou que a operação com uma vazão de entrada mínima constante é uma condição necessária para estabilizar o sistema e mitigar o impacto desses transientes na análise de regime permanente.

Por outro lado, a técnica baseada na relação direta entre a vazão de saída e o nível em tanques pressurizados, na qual a vazão de entrada variou periodicamente e foi analisada a vazão de saída e o nível do sistema, apresentou melhores resultados, com desvios inferiores a 3 % em testes considerando sinais de referência senoidais.

A caracterização estatística dos desvios revelou um comportamento gaussiano, o que classifica a variabilidade como erro aleatório, além da identificação de erros sistemáticos que podem ser eliminados por ajustes de calibração.

É válido pontuar as principais diferenças entre os ensaios em que, no balanço de massas, a curva de calibração foi obtida com o sistema em regime permanente, com o intuito de calcular a vazão de saída com base na frequência do sensor turbina, usando como referência o sensor de vazão nativo da planta. E, após a obtenção da vazão de saída, calcular o volume acumulado no tanque através da diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída.

Já em relação aos ensaios dinâmicos, o objetivo foi analisar o comportamento do nível e da vazão de saída do sistema com base na variação periódica da vazão de entrada. E, por meio dessa variação, foi construída a curva de calibração que correlacionou o nível

e a vazão de saída, tornando possível a medição de nível através da frequência de saída do sensor turbina.

Por fim, os resultados experimentais confirmam que a eficácia das técnicas de medição indireta propostas está diretamente relacionada à resolução do sensor empregado para determinar a vazão de saída do tanque, indicando que a substituição do sensor por uma versão com maior resolução, como, por exemplo, o modelo DN10 da empresa Jujie, que possui erro percentual inferior a 1%, pode ser uma opção interessante para aplicações que demandam maior precisão.

5.1 Etapas futuras

Como trabalhos futuros, propõe-se inicialmente a substituição do sensor YF-S201 por um medidor de vazão com melhor resolução. Há inclusive opções de sensores que apresentam uma menor perda de carga, como, por exemplo, os sensores de vazão ultrasônicos.

Além disso, uma segunda proposta de continuação envolveria a utilização de um algoritmo de fusão sensorial para combinar, de maneira mais eficiente, as informações obtidas a partir dos medidores de vazão de entrada e saída do tanque.

Finalmente, a utilização de algoritmos de estimação de estados poderia ser avaliada. Dessa forma, usando como referência um modelo matemático previamente definido, seria possível estimar o nível do tanque nos instantes futuros em que esse parâmetro não estaria sendo, de fato, medido, possibilitando o controle do nível do tanque.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.
- AGUIRRE, L. A. Fundamentos de instrumentação. *Luis Antonio Aguirre*, 2013.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. d. Fundamentos de metrologia científica e industrial. *Editora Barueri*, 2008.
- BARGIELA, A.; HAINSWORTH, G. D. Pressure and flow uncertainty in water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, v. 115, n. 2, p. 212–229, 1989.
- BEGA, E. A. Instrumentação industrial. 2 edição. *Rio de Janeiro: Interciência: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás*, 2006.
- GOYAL, R. Uncertainty estimation in calibration of instruments of model turbine test facility. *Flow Measurement and Instrumentation*, Elsevier, v. 79, p. 101911, 2021.
- HUSNI, N. L.; BASRI, H.; YANI, I. e. a. Challenges in turbine flow metering system: An overview. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, Bristol, v. 1198, n. 4, p. 042010, 2019.
- ISO/IEC. *Liquid hydrocarbons — Volumetric measurement by turbine flowmeter*. Geneva, CH, 2017.
- KHAJAVIAN, A. et al. Static calibration of wastewater treatment plant models: Investigating calibration processes and objective functions. *Journal of Water Process Engineering*, Elsevier, v. 54, p. 104016, 2023.
- KSB. *KSB*. 2023. Disponível em: <<https://www.ksb.com/pt-br>>. Acesso em: 15 de junho 2023.
- LALNUNTHARI, J.; THANGA, H. H. Dependence of hall effect flow sensor frequency on the attached inlet and outlet pipe size. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*. New York, 2017. p. 56–60.
- LIPTAK, B. G. *Instrument Engineers' Handbook. Volume One: Process Measurement and Analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- MEŠKUOTIENĖ, A. et al. Analysis of liquid quantity measurement in loading/unloading processes in cylindrical tanks. *Computation*, MDPI, v. 10, n. 7, p. 122, 2022.
- MORAES, M. S.; COSTA, R. T. Nível: determinação da quantidade de fluido em um tanque. *Bolsista de Valor*, v. 3, 2013.
- OIML. *The evaluation of flow standards and facilities used for testing water meters*. Paris, FR, 1984.
- OIML. *Fixed storage tanks. General requirements*. Paris, FR, 2008.

OIML. *Automatic level gauges for measuring the level of liquid in stationary storage tanks*. Paris, FR, 2008.

OIML. *Water meters for cold potable water and hot water*. Paris, FR, 2013.

PATON, R. 191: Calibration and standards in flow measurement. 2005.

RADJ, B. M.; KAMALANATHAN, R. Design and analysis of hall effect sensor and arduino controlled liquid flow measurement. *Advances and Applications in Fluid Mechanics*, v. 30, n. 2, p. 147–155, 2023.

SEA Electronic Components. *YF-S201 Water Flow Sensor - Datasheet*. s.d.

SMAR. *SMAR - TECHNOLOGY COMPANY*. 2012. Disponível em: <[https://https://www.smar.com/pt/produto/pd3-303-planta-didatica-profibus](https://www.smar.com/pt/produto/pd3-303-planta-didatica-profibus)>. Acesso em: 04 de abril 2023.

SORLI, M.; FIGLIOLINI, G.; PASTORELLI, S. Dynamic model and experimental investigation of a pneumatic proportional pressure valve. *IEEE/ASME transactions on Mechatronics*, IEEE, v. 9, n. 1, p. 78–86, 2004.

ZEGHLOUL, A.; AZZI, A.; GHENDOUR, N. Design and construction of a turbine flow-meter based on the hall effect to measure volumetric air flow rate. *Mater Biomater Sci*, v. 4, n. 1, p. 86–92, 2021.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado Desenvolvimento de um sistema para medição indireta do nível de tanques industriais é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 5 de março de 2026.

Victor Hugo Godoy